

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
katedra elektroniky

Řídicí jednotka Full-LED světlometu s DC/DC měničem
Controll Unit for Full-LED Headlamp with DC/DC converter

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Richard Böhm**
Studijní program: **N2649 Elektrotechnika**
Studijní obor: **2612T015 Elektronika**
Téma: **Řídicí jednotka Full-LED světlometu s DC/DC měničem**
Control Unit for Full-LED Headlamp with DC/DC Converter
Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

1. Rešerše aktuálního stavu a výběr vhodné varianty řešení.
2. Návrh řídicí jednotky Full-LED světlometu s DC/DC měničem pro aplikaci v automobilovém průmyslu.
3. Realizace funkčního vzorku.
4. Měření a testování vybraných parametrů řídicí jednotky.

Seznam doporučené odborné literatury:

1. Roslák J., Wallaschek J.: Active lighting systems for improved road safety, IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp. 682 - 685, DOI: 10.1109/IVS.2004.1336466, 2004.
2. Yali Guo, Qinxu Wu, Honglei Wang: Design and implementation of intelligent headlamps control system based on CAN bus, International Conference on Systems and Informatics (ICSAI), pp. 385 - 389, DOI: 10.1109/ICSAI.2012.6223640, 2012.
3. Prussler S., Neumann R., Kubena V.: Full Led Front Lights With Adaptive High Beam, Auto Tech Review, Vol. 1, No. 10, pp. 24-28, 2012.
4. Garcia D., Calleja A.J., Garcia J., Ribas J., Rico-Secades M.: Suitable Switching Converter Topologies for Automotive Signal Lamps and Headlamps Using Power LEDs, Industry Applications Society Annual Meeting - IAS '08, pp. 1 - 7, DOI: 10.1109/08IAS.2008.258, 2008.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.**


Konzultant diplomové práce: **Ing. Tomáš Teska**

Datum zadání: **01.09.2015**

Datum odevzdání: **29.04.2016**


doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Šašel, CSc.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá problematikou DC/DC měničů. Hlavní náplní je realizace řídicí jednotky, principiálně řešené pomocí spínaných zdrojů s měniči typu „BOOST“ a „BUCK“. Její využití je směřováno do automobilového průmyslu, konkrétně pro světlomet s využitím LED technologie. Návrh řídicí jednotky je odvozen z optických, mechanických, environmentálních a dalších požadavků. Zahrnuje definici jejich parametrů i detailní syntézu konkrétního obvodového řešení. Součástí práce je experimentální ověření funkce celé řídicí jednotky, analýzu parametrů spínaných zdrojů, srovnání naměřených výsledků s vypočítanými parametry a vyhodnocení jejich shody.

KLÍČOVÁ SLOVA

Full-LED světlomet, řídicí jednotka, DC/DC měnič, spínaný zdroj, LED světlo, PWM modul.

ABSTRACT

This thesis describes DC/DC converters topic. Main subject of this work is Driver Module realization, based on function of switching supplies with “BOOST” and “BUCK” converter types. Its utilization is mainly in automotive, specifically in car headlamps with LED technology. Driver module design follows many optical, mechanical, environmental and other requests. The design also includes parameters determination and detailed synthesis of a particular circuit. A part of the work focuses on experimental verification of the whole module function, switching supplies parameters analysis and comparison and evaluation of measured and calculated results.

KEYWORDS

Full-LED Headlamp, Driver modul, DC/DC converter, Switching power supply, LED light, PWM modul.

BÖHM, R. *Řídící jednotka Full-LED světlometu s DC/DC měničem*. Ostrava: Vysoká škola Báňská, Fakulta elektrotechniky a informatiky, katedra elektroniky, 2016. 65 s., 11 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že diplomovou práci na téma řídicí jednotka Full-LED světlometu s DC/DC měničem jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Ostravě dne 29. dubna 2016



(podpis autora)

Souhlasím se zveřejněním této diplomové práce dle požadavků čl. 26, odst. 9 Studijního a zkušebního řádu pro studium v magisterských programech VŠB-TU Ostrava.

V Ostravě dne 29. dubna 2016



(podpis zástupce firmy)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Pavlovi Brandštetterovi, CSc. a kolegovi Ing. Tomáši Teskovi, za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc při zpracování mé diplomové práce.

OBSAH

Seznam obrázků	ix
Seznam tabulek	xii
Úvod	1
1 Teoretický úvod	2
1.1 Spínané napájecí zdroje	2
1.2 Rozdělení spínaných zdrojů	3
1.3 DC/DC měniče bez transformátorů	3
1.3.1 Propustný snižující měnič ("BUCK")	3
1.3.2 Blokující zvyšující měnič ("BOOST")	4
1.3.3 Blokující invertující měnič ("BUCK-BOOST")	5
1.4 LED (Light-Emitting Diode)	6
2 Koncepce světlometu	8
2.1 Optický systém	8
2.1.1 Reflektor potkávacího světla	8
2.1.2 Reflektor dálkového světla	9
2.1.3 Světlovod pro směrové světlo, denní osvětlení a obrysové světlo.	9
2.2 Elektronika	10
2.2.1 Propojení řídicí jednotky	10
2.2.2 Požadavky na funkčnost	11
2.3 Mechanické provedení	12
3 Návrh řídicí jednotky	13
3.1 Definice výstupních proudů a napětí	14
3.3 Syntéza obvodového řešení řídicí jednotky	16
3.4 Proudový měnič BUCK (LM3406)	18
3.5 Zvyšující napěťový měnič BOOST (MAX16833)	22
3.6 Vstupní filtr a ochranné obvody	28
3.7 PWM generátor	30
3.8 Obvod detekce	32

3.9	Umělá zátěž.....	34
3.10	Logický (ovládací) obvod – tranzistorové řešení	36
4	Praktické ověření a testování řídicí jednotky	38
4.1	Průběhy výstupních veličin.....	38
4.2	Teplotní testy	41
4.3	Měření účinnosti	44
4.4	Vstupní obvod.....	47
4.5	DC/DC měnič BOOST	48
4.6	DC/DC měnič BUCK	50
4.7	Výstupní obvod.....	52
4.8	Detekce a umělá zátěž.....	53
4.9	Elektromagnetická kompatibilita.....	54
5	Závěr	58
	Literatura	60
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	61

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Blokové schéma spínaného zdroje, [3].	2
Obrázek 2: Základní obvodové schéma měniče "BUCK", [6].	4
Obrázek 3: Základní obvodové schéma měniče "BOOST", [6].	5
Obrázek 4: Základní obvodové schéma měniče "BUCK-BOOST", [6].	6
Obrázek 5: Ukázka reálné LED a její schématická značka	7
Obrázek 6: Reflektory potkávacího světla	9
Obrázek 7: Reflektor dálkového světla	9
Obrázek 8: Světlovod pro obrysové, směrové světlo a denní osvětlení	10
Obrázek 9: Propojení řídicí jednotky a světlometu	11
Obrázek 10: Možná podoba světlometu	13
Obrázek 11: Řídicí jednotka jako obecný dvojbran	13
Obrázek 12: Teplotní závislost relativní hodnoty světelného toku při nominálním proudu	14
Obrázek 13: Proudová závislost relativní hodnoty světelného toku při nominální teplotě	14
Obrázek 14: Zapojení LED	16
Obrázek 15: Blokové schéma řídicí jednotky	17
Obrázek 16: Zpětnovazební smyčka obvodu LM3406, [7]	18
Obrázek 17: Schéma zapojení měniče "BUCK"	21
Obrázek 18: Charakteristika závislosti výstupního proudu na externím nastavovacím rezistoru	22
Obrázek 19: Závislost U_{SENSE} vs. U_{CTRL}	23
Obrázek 20: Ukázka zvlnění a špičkového proudu procházející cívkou měniče "BOOST"	25
Obrázek 21: Schéma zapojení měniče "BOOST"	27
Obrázek 22: Schéma zapojení vstupního ochranného obvodu	29
Obrázek 23: Schématické zapojení signálového vstupního obvodu	29
Obrázek 24: Základní schéma PWM generátoru obrysového světla	30
Obrázek 25: Schéma zapojení detekce potkávacího světla	33
Obrázek 26: Schéma zapojení umělé zátěže	35
Obrázek 27: Schéma zapojení logického obvodu	37

Obrázek 28: Fotografie řídicí jednotky.....	38
Obrázek 29: Výstupní zvlnění proudu potkávacího světla	39
Obrázek 30: Výstupní zvlnění proudu dálkového světla	39
Obrázek 31: Výstupní zvlnění proudu směrového světla	39
Obrázek 32: Výstupní zvlnění proudu denního osvětlení.....	39
Obrázek 33: Výstupní zvlnění proudu obrysového světla	40
Obrázek 34: Výstupní zvlnění proudu při zapnutých všech funkcí.....	40
Obrázek 35: Výstupní proud obrysového světla.....	41
Obrázek 36: Výstupní napětí obrysového světla	41
Obrázek 37: Výstupní proud směrového světla.....	41
Obrázek 38: Výstupní napětí směrového světla	41
Obrázek 39: Křivka teplotní kompenzace pro vstupní napětí 9 V.....	43
Obrázek 40: Snímek řídicí jednotky z termo-kamery.....	43
Obrázek 41: Místa umístění termočlánků.....	43
Obrázek 42: Měřené maximální teploty nejzatěžovanějších součástek.....	44
Obrázek 43: Blokové schéma pro měření účinností	45
Obrázek 44: Průběh celkové účinnosti řídicí jednotky v závislosti na vstupním napětí	46
Obrázek 45: Průběhy jednotlivých účinností spínaného zdroje.....	47
Obrázek 46: Vstupní proudová špička.....	47
Obrázek 47: Přepět'ová ochrana.....	47
Obrázek 48: Vybrané napět'ové průběhy na integrovaném obvodu IC4	49
Obrázek 49: Průběh proudu přes spínací cívku a diodu měniče "BOOST"	49
Obrázek 50: Chování měniče "BOOST" při postupném zvyšování vstupního napětí....	49
Obrázek 51: Průběh zapínání tranzistoru.....	49
Obrázek 52: Teplota tranzistoru Q38 v závislosti na kapacitě C51.....	50
Obrázek 54: Průběh napětí na pinu "SW".....	51
Obrázek 53: Průběh napětí na pinu "CS".....	51
Obrázek 55: Porovnávací charakteristika vypočítaných a měřených hodnot výstupního proudu v závislosti na externím nastavovacím rezistoru	52
Obrázek 56: Chování výstupního zkratovacího tranzistoru.....	53
Obrázek 57: Chování detekčního obvodu a proud tekoucí přes detekční pin	54
Obrázek 58: Úrovně šumového signálu injektovaného do napájecí kabeláže.....	55
Obrázek 59: Měření vyzařovacích emisí bez stínící kryt	56
Obrázek 60: měření emisí s ochranným štítem nad měničem "BOOST"	57

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Výkonové zatížení světelných zdrojů při stejném optickém toku	7
Tabulka 2: Přehled optických požadavků a typu použitých LED	8
Tabulka 3: Přehled požadovaných proudů a propustných napětí LED pro jednotlivé funkce.....	15
Tabulka 4: Vypočtená závislost výstupního proudu na externím nastavovacím rezistoru	21
Tabulka 5: Velikost zvlnění jednotlivých funkcí.....	40
Tabulka 6: Vstupní a výstupní proudy, teplotního testu v klimatické komoře	42
Tabulka 7: Teplota nejvíce zatěžovaných součástek, v závislosti na teplotě okolí	44
Tabulka 8: Výkonové zatížení vstupního a zatěžovacího obvodu v závislosti na vstupním napětí UIN	45
Tabulka 9: Výkonové zatížení na vstupech DC/DC měničů v závislosti na vstupním napětí UIN	45
Tabulka 10: Výsledné účinnosti v závislosti na vstupním napětí UIN	46
Tabulka 11: Teplota tranzistoru Q38 v závislosti na kapacitě C51	50
Tabulka 12: Měřená závislost výstupního proudu na externím nastavovacím rezistoru	51

ÚVOD

S nástupem výkonových LED, se světleným tokem nad 1000 lumenů, došlo v automobilovém osvětlovacím průmyslu k rozvoji této technologie, která je dnes využívána u světlometů i pro funkce potkávacího a dálkového světla. Žárovkové světelné zdroje se stále více nahrazují LED technologií a hlavním důvodem je vyšší účinnost LED, které však vyžadují složitější řídicí elektroniku.

Tato práce se zabývá návrhem řídicí jednotky pro full-LED světlomet s pěti světelnými funkcemi: potkávací, dálkové, obrysové, směrové světlo a denní osvětlení. Základem řídicí jednotky jsou spínané zdroje v topologii měničů typu "Boost" a "Buck". Při návrhu byl kladen důraz na co nejnižší cenu, z důvodu zamýšleného použití světlometu v automobilu nižší třídy. Předpokladem je splnění všech standardních požadavků s cílem vytvoření produktu, který může být kvalifikován pro použití v automobilovém průmyslu. Komplexní oblast požadavků zahrnuje vlivy, které na řídicí jednotku působí a podmínky kterým může být vystavena. Jsou to například environmentální vlivy jako teplotní zatěžování, vlhkost nebo elektromagnetické jevy, kterými se zabývá elektromagnetická kompatibilita.

V úvodu jsou detailněji popsány varianty DC/DC měničů pro aplikaci proudových spínaných zdrojů s možností jejich využití při řízení LED světelných zdrojů. Na základě všeobecných požadavků i optického zadání je blokově stanovena koncepce řídicí jednotky s výběrem nejvhodnější varianty DC/DC měniče. Podle koncepčního řešení je na základně definice vstupních a výstupních elektrických veličin navrženo detailní obvodové schéma. Po návrhu elektronického řešení je řídicí jednotka fyzicky realizována na desce plošných spojů. Pro ověření shody měřených parametrů s předpokládanými a vypočítanými hodnotami je sestaven seznam testů, podle kterého budou části řídicí jednotky testovány a výsledky následně porovnány.

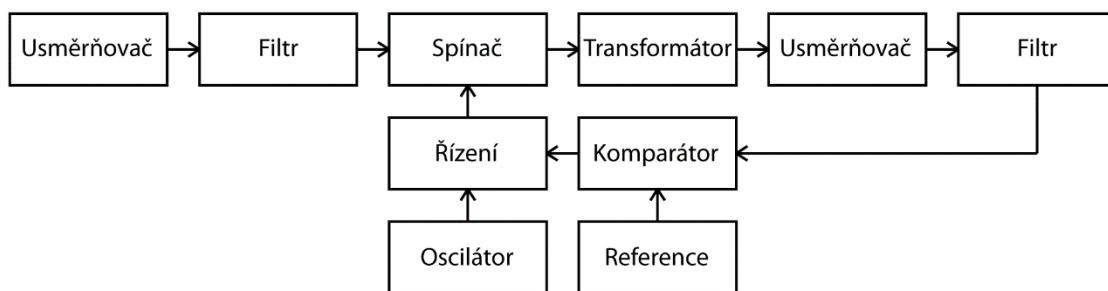
Kromě samotných DC/DC měničů budou navrženy i další dílčí části řídicí jednotky, jako například PWM moduly pro tlumení světelného toku, vstupní obvody které musí zajistit spolehlivé propojení s automobilem, nebo detekční obvody pro signalizaci poruchy LED na přístrojovém panelu uvnitř automobilu.

1 TEORETICKÝ ÚVOD

1.1 Spínané napájecí zdroje

DC/DC měnič je jeden z typů napájecích zdrojů. Je to elektronický obvod, který přeměňuje vstupní stejnosměrný signál na výstupní stejnosměrný signál o nižším nebo vyšším napětí (záleží na zvolené variantě). Tyto měniče lze použít i pro přeměnu střídavého signálu na stejnosměrný s jinými parametry na výstupu, stačí před samotný DC/DC měnič připojit usměrňovací obvod. Ve srovnání s lineárními zdroji, které mají výkonovou účinnost kolem 30 %, je návrh spínaných zdrojů náročnější, nespornou výhodou však jsou nízké spínací ztráty, nízká hmotnost a velikost. Přes sepnutý spínací prvek teče poměrně velký proud, ovšem úbytek napětí je velmi nízký. V opačném případě kdy je spínač rozepnutý, je úbytek napětí velký, ale proud velmi malý. Nevýhodou spínaných zdrojů je vysoká cena součástek pracujících na vysoké frekvenci a také nutnost potýkat se s emisemi vyzařovanými při vysokofrekvenčním spínání.

Základní blokové schéma spínaného zdroje, [3] je uvedeno na obrázku 1. Spínaný zdroj ovšem nemusí obsahovat všechny uvedené bloky, záleží na zvolené variantě spínaného zdroje.



Obrázek 1: Blokové schéma spínaného zdroje, [3].

Princip činnosti je následující. Jako první je třeba převést vstupní střídavý signál (často o kmitočtu 50 Hz) na stejnosměrný a to pomocí usměrňovače. Dále je použitý filtr (typu DP) pro vyhlazení střídavé složky. Dalším blokem je spínač, který je tvořen především tranzistorem a dalšími pomocnými obvody. Jeho úkolem je vytvářet střídavý obdélníkový či trojúhelníkový průběh o různém kmitočtu spínání (20 kHz – 1 MHz). Transformátorem se následně upraví velikost střídavého napětí na požadovanou hodnotu a usměrňovačem znovu usměrní na stejnosměrnou složku. Po opětovné filtraci střídavé složky následuje zpětná vazba, ve které se nachází komparátor, který porovnává výstupní hodnotu napětí s referenční hodnotou. Pokud se objeví odchylka tak se změní činitel plnění nebo kmitočet aby se výstupní napětí stabilizovalo, [3].

1.2 Rozdělení spínaných zdrojů

Spínané zdroje lze rozdělit následovně:

SPÍNANÉ ZDROJE BEZ TRANSFORMÁTORŮ

- ❖ Propustné měniče - BUCK (snižující)
- ❖ Blokující měniče - BOOST (zvyšující)
- BUCK-BOOST (invertující)

SPÍNANÉ ZDROJE S TRANSFORMÁTOREM

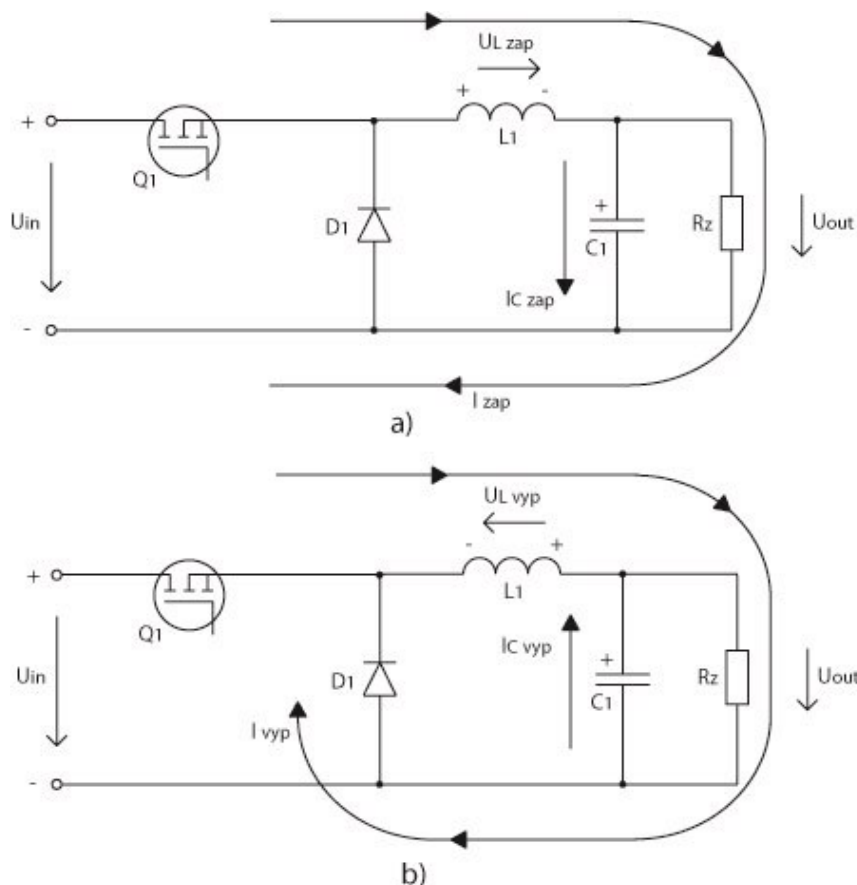
- ❖ Jednočinné měniče - FORWARD (propustné)
- FLYBACK (blokující)
- ❖ Dvojčinné měniče - PUSH-PULL
- HALF-BRIDGE (poloviční most)
- FULL-BRIDGE (plný most)

1.3 DC/DC měniče bez transformátorů

1.3.1 Propustný snižující měnič ("BUCK")

Jak už z názvu vyplývá, tento měnič slouží k přeměně výstupního napětí na menší hodnoty než je napětí vstupní. Teoreticky lze nastavit výstupní napětí od maximálního vstupního napětí až po nulové napětí. V praxi maximální hodnotu omezují vlastnosti řídicího obvodu.

Základní obvodové schéma se zobrazením proudu ve dvou fázích je uvedeno na obrázku 2. Jak lze vidět, skládá se ze spínače tvořeného nejčastěji tranzistorem, diody k určení orientace směru proudu, cívky, která po odpojení zdroje zastává jeho funkci a kondenzátoru.



Obrázek 2: Základní obvodové schéma měniče "BUCK", [6].

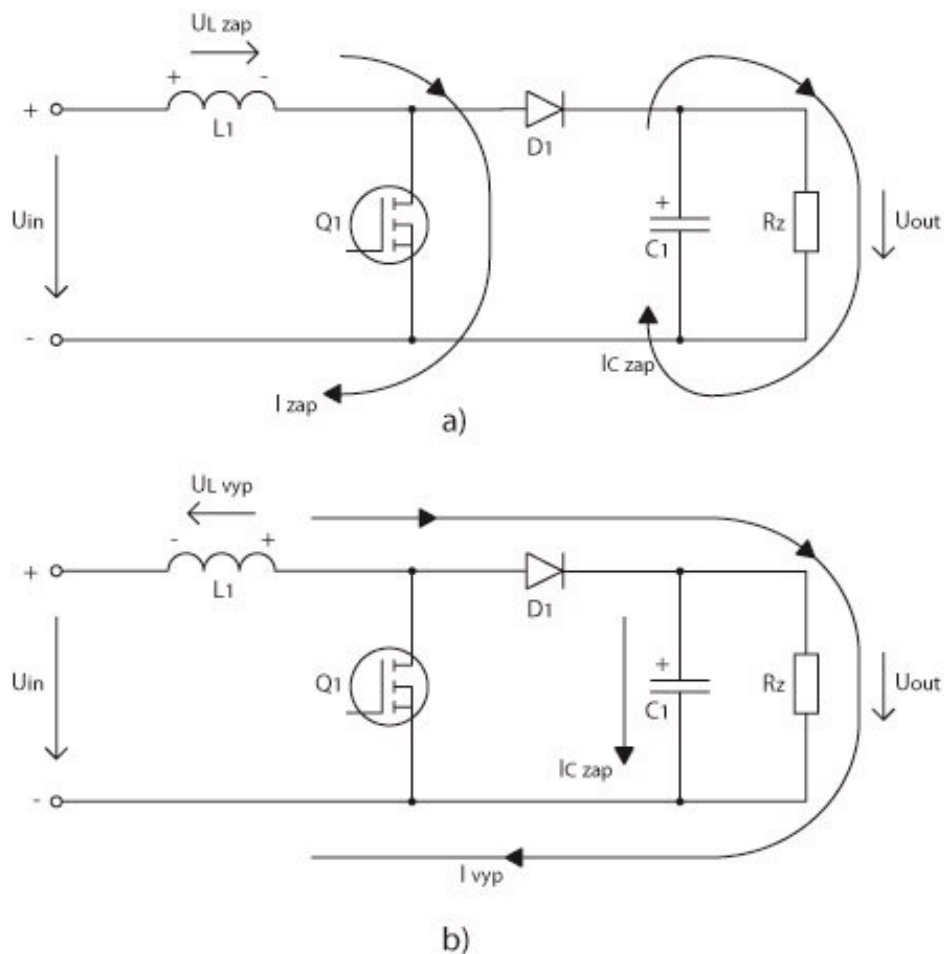
Po sepnutí tranzistoru Q_1 prochází proud ze zdroje přes cívku L_1 přímo do zátěže R_Z . Dioda D_1 je tedy v závěrném směru a neprochází jí proud. Cívka L_1 se tedy chová jako spotřebič a napětí $U_{L\ ZAP}$ má stejnou polaritu jako protékající proud. Kondenzátor C_1 se v tomto režimu nabíjí proudem $I_{C\ ZAP}$. Výsledkem tohoto cyklu je rostoucí výstupní napětí U_{OUT} .

Ve druhé fázi, při rozepnutí tranzistoru Q_1 se zdrojem proudu stává cívka L_1 , která se uzavírá do zátěže R_Z přes diodu D_1 . Proud I_{VYP} zachovává směr, ale cívka obrátí svou polaritu a také se změnila polarita průchodu proudu kondenzátorem $I_{C\ VYP}$, který nyní podporuje proud tekoucí do zátěže R_Z . Kondenzátor také napomáhá k zmenšování výstupního zvlnění, [6].

1.3.2 Blokující zvyšující měnič ("BOOST")

Tento měnič slouží k zvýšení výstupního napětí proti vstupnímu napětí. Minimální hodnotu výstupního napětí určuje maximální hodnota vstupního napájecího napětí. Tento měnič je schopen na výstupu dosáhnout až padesáti-násobku vstupního napětí.

Základní obvodové schéma s protékajícími proudy ve dvou fázích je znázorněno na obrázku 3. Tak jako v předchozím případě se skládá ze spínače, diody, cívky a kondenzátoru, ale v jiném uspořádání součástek. Cívka L_1 je v sérii se zdrojem a spínač ve formě tranzistoru cívku uzemňuje nebo zapojí do série s diodou D_1 na zátěž R_Z .



Obrázek 3: Základní obvodové schéma měniče "BOOST", [6].

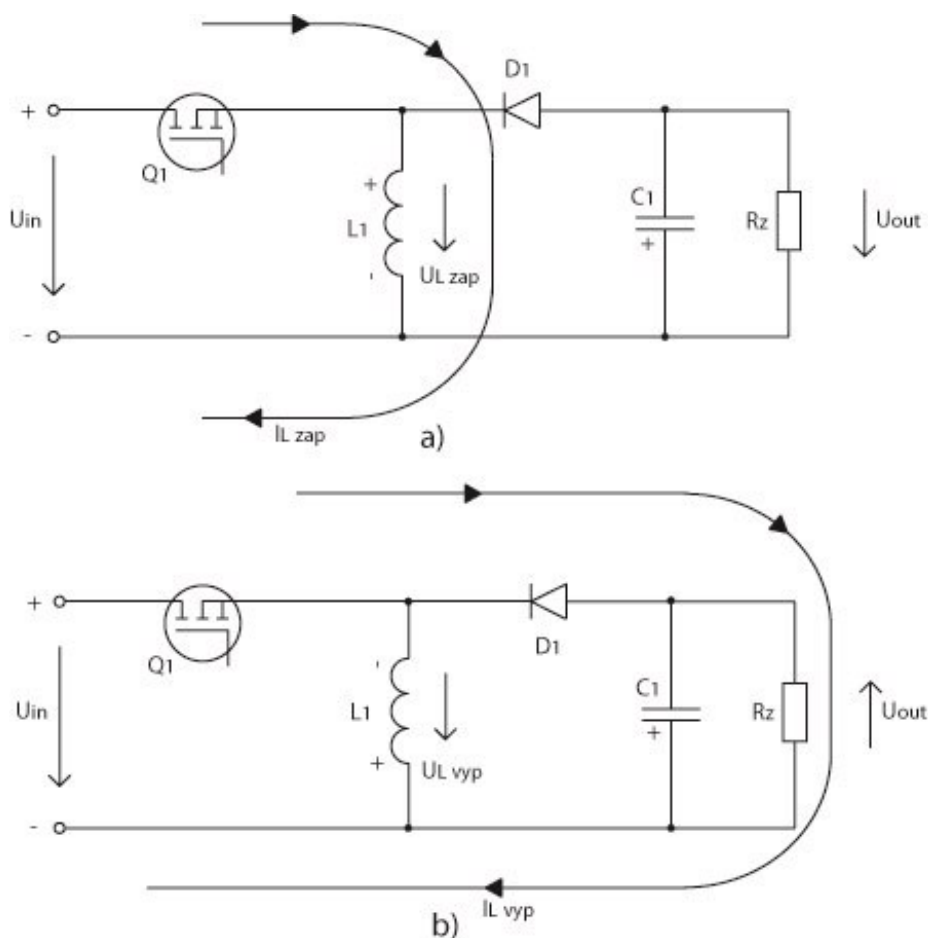
V první fázi, při sepnutí spínače Q_1 začne cívkou narůstat proud $I_{L\text{ zap}}$. Cívka se tedy chová jako spotřebič a v jejím magnetickém poli se akumuluje energie. Napětí na cívce L_1 má stejnou polaritu jako protékající proud. Dioda D_1 zároveň zabráňuje, aby se kondenzátor C_1 vybíjel přes spínač Q_1 . Z toho vyplývá, že při sepnutém spínači Q_1 je proud do zátěže dodáván pouze z kondenzátoru C_1 .

Ve druhé fázi, při rozepnutí spínače Q_1 cívka L_1 není spotřebičem, nýbrž zdrojem, který zachovává směr toku proudu a obrací svou polaritu. Cívka je sériově spojena s napájecím zdrojem U_{IN} a její naindukované napětí se sčítá s napájecím napětím. Proud protéká do zátěže přes diodu D_1 , která je ve vodivém stavu a zároveň dobíjí kondenzátor C_1 proudem $I_{C\text{ vyp}}$, [6].

1.3.3 Blokující invertující měnič ("BUCK-BOOST")

Výhodou tohoto měniče je možnost generovat na výstupu jak menší hodnoty napětí, tak i větší hodnoty napětí než dodává vstupní zdroj napětí.

Tohoto jevu je možné docílit, pokud je cívka L_1 připojena paralelně k zátěži R_Z . Celkové zjednodušené schéma zapojení invertujícího spínaného zdroje je uvedeno na obrázku 4.



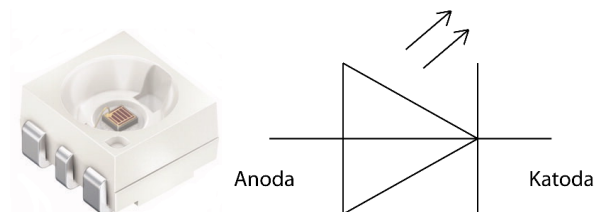
Obrázek 4: Základní obvodové schéma měniče "BUCK-BOOST", [6].

Opět existují dva různé stavy toku proudu obvodem. Pokud sepne spínací tranzistor Q_1 , pak proud dodávaný zdrojem bude protékat přes cívku L_1 a lineárně vzrůstat. Dioda D_1 je v závěrném směru a proud jí tedy nemůže procházet. Cívka L_1 se tedy chová jako spotřebič a napětí $U_{L\text{ zap}}$ má stejnou polaritu jako proud $I_{L\text{ zap}}$. Do zátěže je tedy dodáván proud pouze z kondenzátoru C_1 a výstupní napětí U_{OUT} klesá.

V době rozeptnutí spínacího tranzistoru Q_1 se z cívky L_1 stává zdroj proudu $I_{L\text{ vyp}}$, který má stejný směr jako měl proud $I_{L\text{ zap}}$. Napětí na cívce L_1 se ale obrací a diodou D_1 tedy prochází proud do zátěže R_Z . Současně se také nabíjí kondenzátor C_1 a výstup napětí U_{OUT} roste, [6].

1.4 LED (Light-Emitting Diode)

Dioda emitující světlo je polovodičová elektronická součástka obsahující PN přechod, která vyzařuje světelné záření o různých vlnových délkách. Princip LED byl objeven již ve 20. letech minulého století, ale první diody v praxi byly použity až v roce 1962. V posledních letech zaznamenávají LED diody obrovský dynamický rozvoj, [1], [2].



Obrázek 5: Ukázka reálné LED a její schématická značka

Nekoherentní světlo vzniká po průchodu elektrického proudu v propustném směru přechodu PN. Barva, kterou bude dioda svítit, závisí na chemickém složení použitého polovodiče. První diody vyzařovaly světlo červené, po té přicházely další barvy jako zelená, oranžová, žlutá a nakonec modrá barva. Díky vzniku modré LED mohla vzniknout dioda emitující bílé světlo a to s pomocí luminoforu. Některé typy LED emitující ultrafialové záření, které jsou přímo na čipu luminoforem převáděny na bílé světlo [1], [2].

Tabulka 1: Výkonové zatížení světelných zdrojů při stejném optickém toku

Typ světelného zdroje	Výkon [W]	Světelný tok [lm]
Žárovka	100	1300
Halogenová žárovka	70	
Zářivka (úsporná)	23	
LED	15	

LED diodou v propustném směru prochází proud o různých velikostech a tím je určeno také maximum vyzářeného toku. U nízko-příkonových LED se pohybuje od cca. 1 mA až po výkonové LED, u kterých může procházet proud PN přechodem nad 1 A, [1].

Výhody:

- 10x vyšší účinnost než žárovky
- 2x vyšší účinnost než zářivky
- Vyzařování světla v požadované barvě bez barevných filtrů
- Nemění svou barvu při snížení napájecího proudu.
- Nenastává problém při častém vypínání a zapínání
- Dlouhá životnost (až 1 000 000 hodin)

Nevýhody:

- Životnost závisí na teplotě (čím vyšší teplota tím menší životnost)
- Vyšší pořizovací náklady (cena za lumen)
- Při přepólování dochází k nenávratné destrukci PN přechodu

2 KONCEPCE SVĚTLOMETU

Trendem v automobilovém průmyslu v posledních letech je neustálé zlepšování a rozšiřování nabídky za účelem zvyšování bezpečnosti, komfortu, zlepšování vzhledu, ale také šetření prostředků a životního prostředí. Ve vývoji světlometů to zapříčinilo, že se kromě základních funkcí, kterými jsou potkávací, dálkové, směrové a obrysové světlo začaly využívat ještě další, doplňkové funkce jako denní osvětlení nebo rohové světlo. Požadavkem zákazníka v tomto případě byl světlomet, který bude kromě základních funkcí disponovat i denním osvětlením. Důvod byl ten, že denní svícení je standardem na většině předních světel vybavenými LED technologií. Střední třída vozidel, pro kterou zákazník využití světlometu zamýšlel, obvykle nemívá LED zdroje i na funkcích jako je potkávací nebo dálkové světlo. Tento faktor je nejvýznamnější důvod toho, že je tak velký tlak právě na cenu. Pro koncové zákazníky budou tato světla nabízena jako nadstandardní výbava.

2.1 Optický systém

Výběr konkrétního optického konceptu byl závislý na ceně nabízených variant. Nejprve byly diskutovány varianty s částečným využitím LED světelných zdrojů, přičemž jako klasické, žárovkové funkce připadaly v úvahu zejména směrové a dálkové světlo. Na základě celkové ceny s ohledem i na elektroniku byla na přání zákazníka vybrána varianta světlometu s výhradně LED světelnými zdroji. Kompletní přehled optických požadavků včetně výběru typu LED pro každou z funkcí shrnuje tabulka 2.

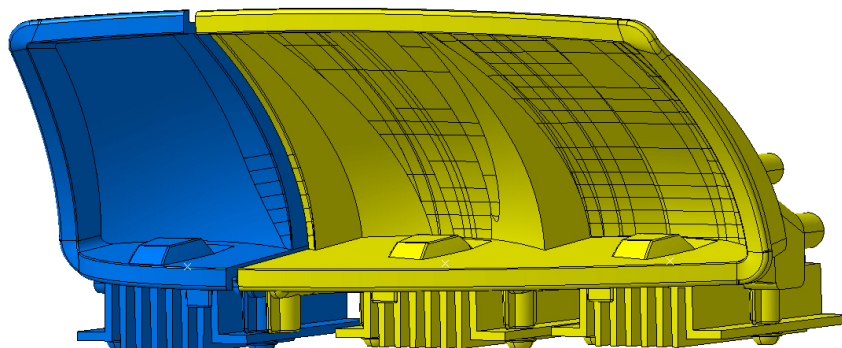
Tabulka 2: Přehled optických požadavků a typu použitých LED

Funkce	Optický systém	Typ LED	Barva LED	Počet LED	Světelný tok jedné LED	Celkový světelný tok
Potkávací světlo	3x Reflektor	NCSW170BT	Bílá	3	500 <i>lm</i> /LED	1500 <i>lm</i>
Dálkové světlo	2x Reflektor	NCSW170BT	Bílá	2	500 <i>lm</i> /LED	1000 <i>lm</i>
Směrové světlo	Světlovod s kolimátory	NCSA170BT	Žlutá	6	60 <i>lm</i> /LED	360 <i>lm</i>
Denní osvětlení		NJSW172AT	Bílá	6	70 <i>lm</i> /LED	420 <i>lm</i>
Obrysové světlo					7 <i>lm</i> /LED	42 <i>lm</i>

2.1.1 Reflektor potkávacího světla

Primární funkcí potkávacího světla je dostatečné osvětlení prostoru před autem při jízdě v nočním režimu a také jeho viditelnost ostatními účastníky silničního provozu.

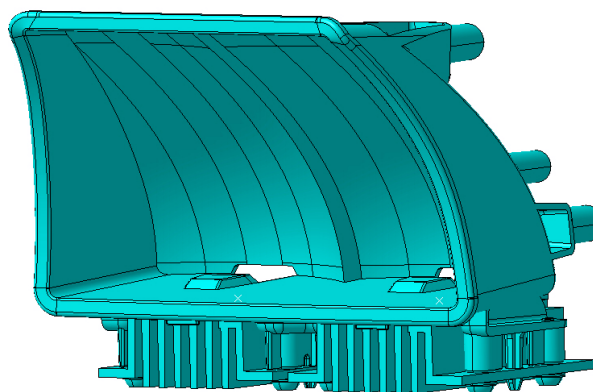
Funkce se skládá ze dvou reflektorových jednotek. Základní část, anglicky nazývaná "BASE" obsahuje jednu dvoj-čipovou LED v každém reflektoru. Klínová část, anglicky nazývaná "KINK" je tvořena jedním reflektorem s jednou dvoj-čipovou LED. Všechny tři LED bílé barvy vyrábí firma NICHIA pod typovým označením NCSW170BT.



Obrázek 6: Reflektory potkávacího světla

2.1.2 Reflektor dálkového světla

Dálkové světlo slouží k osvětlení prostoru před vozidlem ve větší vzdálenosti. Zde je tvořeno dvěma reflektory se dvěma LED stejného typu jako v případě potkávacího světla.

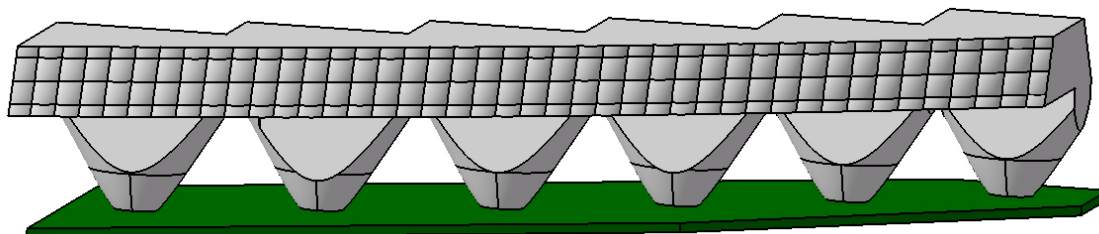


Obrázek 7: Reflektor dálkového světla

2.1.3 Světlovod pro směrové světlo, denní osvětlení a obrysové světlo.

Funkce směrového, obrysového světla a denního osvětlení jsou signálové funkce. Jejich primárním úkolem je viditelnost automobilu v různých režimech. Směrovým a obrysovým světlem musí být vybaven každý automobil. Dokonce legislativa přikazuje, že v případě poruchy funkce směrového světla musí být informován řidič vozidla (například signalizací na přístrojové desce). Povinností řidiče v takovém případě je navštívit servis, aby nebyla ohrožena bezpečnost silničního provozu. Denní osvětlení nahrazuje funkci potkávacího světla za účelem úspory energie. Důvod je ten, že pokud je venku dostatek světla, není potřeba osvětlovat prostor před autem.

Výstupní světelné výkony jsou výrazně nižší než u výkonových funkcí a proto je možné všechny signálové funkce integrovat do jednoho optického systému, kterým je v tomto případě světlovod s kolimátory. V zásadě pro takový optický systém platí, že homogenita světla je závislá na počtu kolimátorů, které do světlovodu svítí. Počet použitých LED v tom případě závisí pouze na počtu kolimátorů. Čím více kolimátorů, a tedy i LED, tím lepší bude homogenita světla. V případě navrhovaného světlometu byl zadán světlovod s šesti kolimátory.



Obrázek 8: Světlovod pro obrysové, směrové světlo a denní osvětlení

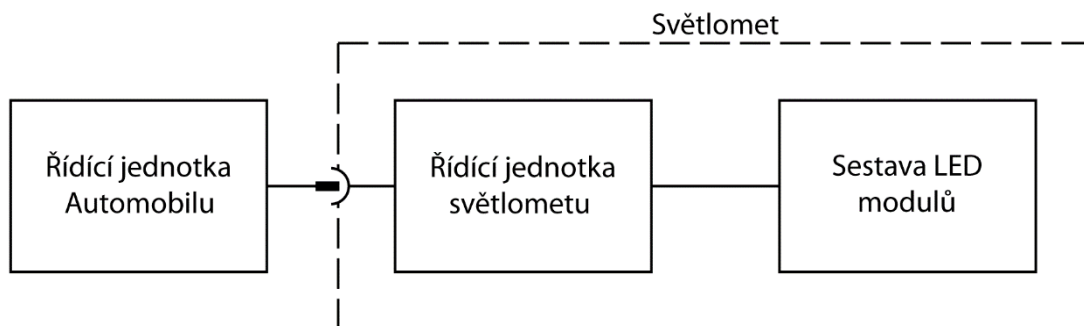
Do každého z kolimátorů svítí jedna bílá a jedna žlutá LED tak, aby bylo možné rozsvítit světlovod žlutou barvou pro funkci směrového světla a bílou barvou pro denní osvětlení nebo obrysové světlo. Pro funkci obrysového světla je dáno, že hodnota vyzařovaného světelného toku je 10 % hodnoty potřebné pro splnění funkce denního osvětlení. Z toho plyne, že i světelný tok jedné LED musí být možné snížit na 10 % hodnoty při provozování funkce denního osvětlení.

2.2 Elektronika

Ke splnění parametrů definovaných optickým systémem vyžadují LED zdroje řídicí elektroniku, která musí zaručit bezchybný provoz za všech předepsaných okolností. Řídicí zdroje pro obsluhu všech funkcí budou tvořit dohromady samostatnou řídicí jednotku, jejíž primární úkol bude řízení LED funkcí světlometu na základě povelů z řídicí jednotky uvnitř automobilu, se kterou je propojena. Kromě toho musí řídicí jednotka vyhovět všem legislativním požadavkům a požadavkům zákazníka.

2.2.1 Propojení řídicí jednotky

Propojení světlometu, ve kterém je řídicí jednotka umístěna, a řídicí jednotky automobilu zajišťuje hlavní kabeláž. Prostřednictvím pěti signálových vstupů jsou ovládány všechny funkce, další signálový vstup je diagnostický. Jeden výkonový signál řídicí jednotce zprostředkovává trvalé napájení. Jak je ukázáno na obrázku 9, tato hlavní kabeláž je tvořena ze dvou dílčích částí, rozdělených hlavním konektorem, který je uchycen v pouzdře světlometu. Přívodní kabeláž je trvale spojená s řídicí jednotkou automobilu a zapojuje se do hlavního konektoru, který je součástí napájecí kabeláže světlometu. Napájecí kabeláž je na jedné straně opatřena hlavním konektorem a přivádí signály přímo do řídicí jednotky světla prostřednictvím napájecího konektoru. Interní propojení LED modulů a řídicí jednotky zajišťuje propojovací kabeláž, připojená výstupním konektorem.



Obrázek 9: Propojení řídicí jednotky a světlometu

2.2.2 Požadavky na funkčnost

Soubor prováděných testů elektronických částí světlometu zahrnuje požadavky z několika oblastí a při návrhu elektroniky musí být zohledněny. Například environmentální testy jsou vybrány tak, aby co nejlépe simulovaly prostředí uvnitř světlometu, i za nejhorších možných podmínek provozu elektroniky. Například provozuschopnost v rozsahu okolních teplot T_A od -40°C do 105°C . Jejich součástí jsou i zátěžové vlhkostní zkoušky, vibrační a další teplotní testy. Požadavky zákazníka, tedy zadavatele projektu, vyplývají mimo jiné z elektronických parametrů elektroinstalační sítě automobilu a vlastností akumulátoru. Základní pracovní rozsah napětí, kdy má světlomet plnit požadavky je 9 až 16 V. Tato napětí zahrnují veškeré provozní podmínky jako například vybitá baterie nebo přebíjení akumulátoru. Další napěťové limity jsou předmětem pulsních testů v rámci testování elektromagnetické kompatibility. Jejich parametry jsou specifikované v oficiálním dokumentu zákazníka a zahrnují například puls reverzního napětí, startovací puls, který má za následek pokles napájení na hodnotu 7 V, ojedinělý puls 35 V nebo výpadky napájecího napětí. Kritériem vyhodnocení některých testů bývá zachování plné funkčnosti, zajištění části světelného výstupu nebo například návrat k bezchybné funkci po skončení testovací sekvence. Mezi další požadavky patří testování přechodových proudů při spínání a vypínání jednotlivých funkcí, proudové limity signálů, nebo časy, za které musí dojít k rozsvícení světla po zapnutí funkce. Kromě pulsního testování, anglicky označovaných zkratkou CI ("conducted immunity"), zahrnuje validace elektromagnetické kompatibility ještě testování odolnosti vůči rušení indukovaného do kabeláže (anglicky "Bulk Current Injection" BCI), měření vyzařovaných emisí ("radiated emission" RE), imunita vůči rušení šířeného v prostředí ("radiated immunity" RI) a vyzařované rušení, šířené po vodičích ("conducted emission").

Většina testů uvedených ve specifikaci zákazníka nejsou součástí dostupné literatury a překračují rozsah diplomové práce. Nejdůležitější z nich proto byly vybrány a sestaveny do seznamu testů tak, aby bylo co nejlépe ověřeno, že navržené řešení řídicí jednotky světlometu vyhovuje všem požadavkům a může být součástí světlometu automobilu v běžném provozu. V kapitole 4 bude názorně ilustrováno provedení i vyhodnocení testů.

Seznam testů, které budou vykonány:

- 1) Měření hodnoty zvlnění výstupních proudů.
- 2) Test funkce v celém rozsahu pracovních teplot a napětí.
- 3) Měření maximální teploty na desce plošných spojů

- 4) Výkonová účinnost v rozsahu provozních napětí.
- 5) Testování nárazových proudů ("inrush") při aktivaci funkcí.
- 6) Testování funkčnosti při poklesu napájecího napětí na 7 V při startovacím pulsu.
- 7) Testování elektromagnetické kompatibility

Jedním z požadavků, zmíněných v kapitole 2.1.3, je nutnost informovat řidiče v případě jakékoliv poruchy směrového světla. Elektronika musí mít schopnost tento stav vyhodnotit a následně řidiče prostřednictvím přístrojové desky informovat. Světlomet je na jeho hlavním konektoru doplněn o detekční pin, který je připojen k trvalému napájení se základním rozsahem napětí 9 až 16 V a úkolem tohoto propojovacího signálu je poruchový stav signalizovat řídící jednotce automobilu na základě proudového odběru, který je odvozen od žárovkových funkcí, protože jejich proudová spotřeba je v případě přepálení vlákna nulová. V případě, že dojde k poruše, musí signalizovaný stav zůstat neměnný až do restartu zapalování.

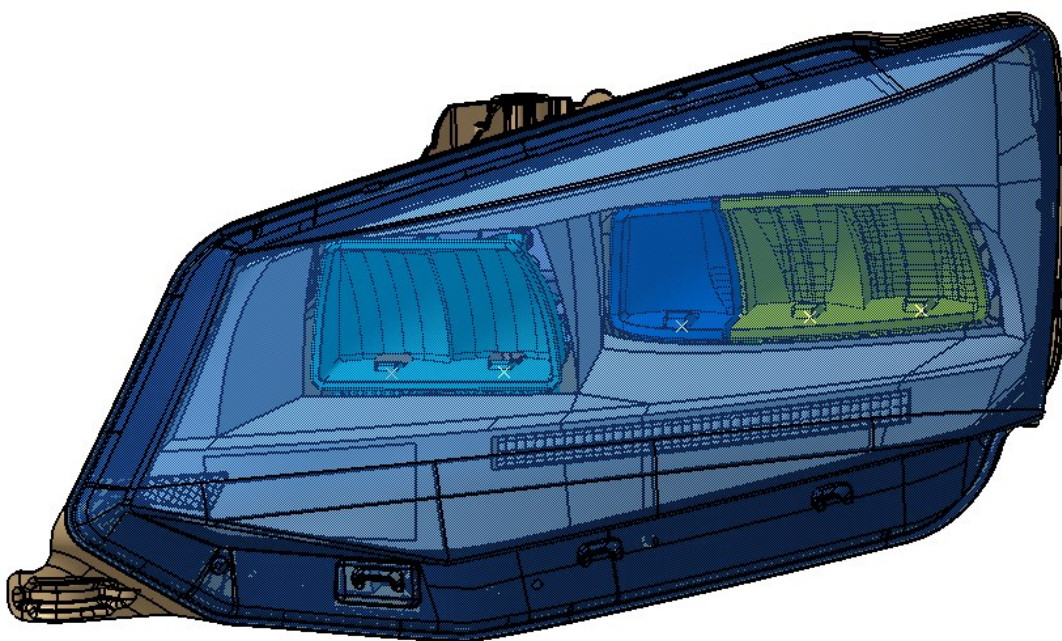
2.3 Mechanické provedení

Mechanické seskupení komponentů včetně řídící jednotky uvnitř světlometu závisí mimo jiné i na optických a elektronických požadavcích. Umístění LED modulů je stanoveno optickým zadáním a z něho vyplývá i umístění elektronické řídící jednotky, která vyžaduje co nejkratší vodiče připojující LED. S ohledem na nízkou cenu bude řídící jednotka umístěna uvnitř světlometu, nevyžaduje tedy hermetický kovový obal, který by byl montován do pouzdra světlometu z vnější strany. Uchycení lze provést pomocí plastových kolejnic se šroubovatelnou západkou, která bude pevně fixovat řídící jednotku. Plocha řídící jednotky, kterou je potřeba pro chlazení výkonu vzniklého řízením LED, lze odvodit na základě požadovaného světelného výstupu a její předpokládané účinnosti. Hodnota ztrátového výkonu při předpokladu výstupního výkonu 45 W a účinnosti 75 % je 11,25 W. Podle používané závislosti potřebné plochy desky plošných spojů 10 cm²/W, je požadovaná minimální plocha řídící jednotky 112,5 cm². Podle místa pro zástavbu řídící jednotky ve světlometu byla vybrána deska řídící jednotky s rozměry 12 x 10 cm.

Technologické parametry řídící jednotky byly voleny podle zamýšleného elektronického provedení. Spínané zdroje vyžadují čtyřvrstvou plátovanou desku FR4. Na desku plošného spoje byl přidán i stínící kryt, který bude schopen eliminovat vysokofrekvenční rušící signály od spínaných zdrojů. Propojení s kabelážemi zajistí nasouvací konektory typu "Card-Edge", kterým se musí přizpůsobit tloušťka substrátu 1,5 mm. Konektory byly vybrány s ohledem na cenu. Povrchová úprava může být například bezolovnatý HAL. Při návrhu desky plošných spojů podle konečné verze schématu budou dodrženy základní pravidla pro kreslení plošných spojů s ohledem na rozložení tepla a elektromagnetickou kompatibilitu.

Kabeláže musí být dimenzovány tak, aby proudové zatížitelnosti vodičů odpovídaly maximálním hodnotám proudů. Při vstupním výkonu, přesahujícím 50 W musí být i napájecí piny napájecího konektoru zdvojené, aby byly schopny pojmout proudy přes 6 A při minimálním napájecím napětí 9 V.

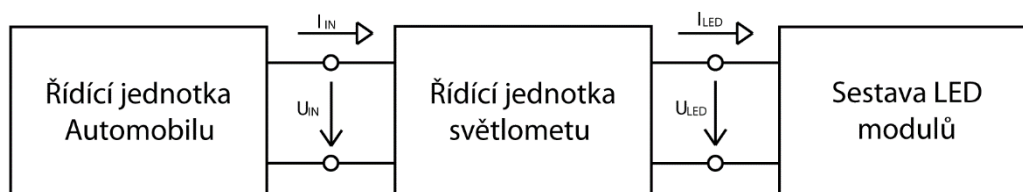
Obrázek možné podoby světlometu je na obrázku 10.



Obrázek 10: Možná podoba světlometu

3 NÁVRH ŘÍDÍCÍ JEDNOTKY

Řídicí jednotku lze zjednodušeně popsat jako obecný dvojbran (obrázek 11), který je charakterizován vstupními a výstupními elektronickými parametry. Vstupní napěťový rozsah U_{IN} a rozsah výstupních napětí U_{LED} připojované zátěže spolu s potřebným výstupním proudem I_{LED} je hlavním faktorem, podle kterého je potřeba stanovit topologii elektronického řešení řídicí jednotky. Podmínkou pro plnou funkcionalitu řídicí jednotky je dodržení vstupních parametrů, jako například vstupní napětí nebo teplotní rozsah.

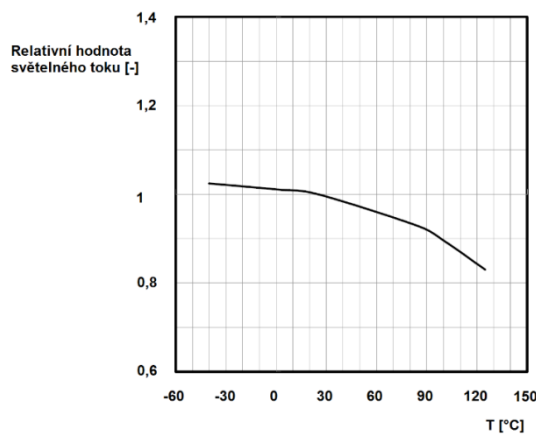


Obrázek 11: Řídicí jednotka jako obecný dvojbran

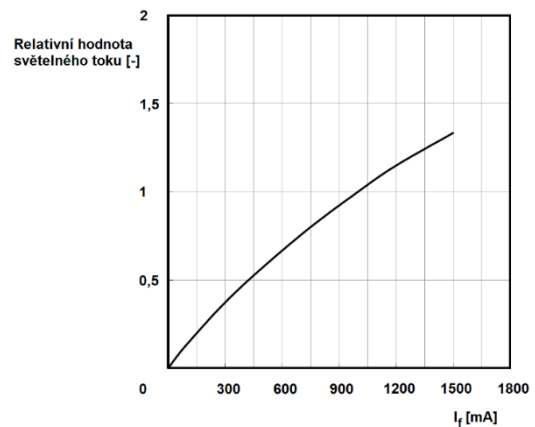
Na základě požadavků uvedených v tabulce 2 je možné odvodit výstupní parametry, které řídicí jednotka musí plnit. Určujícím je maximální propustné napětí LED, jejich počet a světelný tok respektive hodnota proudu.

3.1 Definice výstupních proudů a napětí

Podle požadovaného světelného toku nejvýkonnějších LED, tedy těch pro funkce potkávacího a dálkového světla ϕ_P, ϕ_D , je prvním krokem k odvození všech potřebných parametrů volba proudu I_P, I_D . Indexy P a D označují potkávací a dálkové světlo. Světelný tok LED zdroje je závislý na teplotě, proto i proud je potřeba volit s ohledem na maximální teplotu prostředí 85°C . Po odečtení koeficientu světelného toku v závislosti na teplotě σ_T podle obrázku 12, lze s pomocí znalosti nominálního světelného toku pro 25°C vypočítat (rovnice 1) proudový koeficient světelného toku σ_I .



Obrázek 12: Teplotní závislost relativní hodnoty světelného toku při nominálním proudu



Obrázek 13: Proudová závislost relativní hodnoty světelného toku při nominální teplotě

Výčet parametrů potřebný pro výpočet proudu:

$$T_{MAX} = 85^\circ\text{C}$$

$$T_{NOM} = 25^\circ\text{C}$$

$$\phi_{NOM P} = \phi_{NOM D} = 625 \text{ lm}$$

$$\phi_P = \phi_D = 500 \text{ lm}$$

$$\sigma_{TP} = \sigma_{TD} = 0,92$$

$$\sigma_{IP} = \sigma_{ID} = \frac{\phi_P}{\phi_{NOM P} \cdot \sigma_{TP}} = \frac{\phi_D}{\phi_{NOM D} \cdot \sigma_{TD}} = \frac{500}{625 \cdot 0,92} = 0,869 \quad (1)$$

Z vypočítaného proudového koeficientu světelného toku σ_I a grafu na obrázku 13 lze odečíst hodnotu potřebného proudu LED potkávacího světla I_P a dálkového světla I_D , která je přibližně 900 mA . Za předpokladu sériového spojování jednotlivých LED je předurčeno, že řídicí jednotka bude plnit funkci proudového zdroje s hodnotou výstupního proudu $I_{LED} = 900 \text{ mA}$. Stejný výpočet byl aplikován na ostatní funkce, s výjimkou obrysového světla, které bude využívat stejné LED jako denní osvětlení, ale s tlumeným světelným tokem na hodnotu $D_{OS} = 10\%$. Hodnoty požadovaných proudů shrnuje tabulka 3, ve které jsou uvedeny i hodnoty maximálních propustných napětí použitých LED podle katalogového listu výrobce.

Tabulka 3: Přehled požadovaných proudů a propustných napětí LED pro jednotlivé funkce

LED	Funkce	Požadovaný světelný tok LED [lm]	Maximální propustné napětí [V]	Nominální světelný tok [lm]	Teplotní koeficient světelného toku T=85°C	Požadovaný proud [mA]
NC2W170BT	Potkávací, dálkové světlo	500	7,4	625	0,92	900
NJSW172AT	Denní světlo	70	3,45	111,25	0,92	250
NCSA170BT	Směrové světlo	70	3,7	175	0,9	350

S ohledem na požadovanou nízkou cenu se nabízí možnost využít stejný proudový zdroj pro všechny funkce. Problém v takovém případě může být velikost proudu výkonových funkcí, která převyšuje běžné limity méně výkonných LED, určených pro signálové funkce. Možné řešení je serio-paralelní spojování LED a diverzifikace výstupního proudu mezi více, vedle sebe řazených stringů. Podmínkou však je, aby součet proudů paralelně spojovaných LED byl vždy stejný jako proud vypočítaný pro potkávací a dálkové světlo, tedy $I_{LED} = I_P = I_D = 900 \text{ mA}$.

Funkce denního osvětlení vyžaduje proud 250 mA na každou LED. Při dělení proudu 900 mA vychází jako největší možný dělitel číslo tři, neboli 300 mA na každou LED. Legislativa však umožňuje u funkce relativně širokou toleranci a proto může světelný tok překračovat stanovenou hodnotu $\phi_{D0} = 70 \text{ lm}$ a proud denního osvětlení $I_{D0} = 300 \text{ mA}$ je přípustný.

Dle legislativních požadavků má směrové světlo ve srovnání s denním osvětlením vyšší nároky na přesnost hodnoty světelného toku. Z toho důvodu nelze volit proud dělením celkového proudu celými čísly tak jako u denního osvětlení, ale je zapotřebí doplnit regulaci světelného toku pomocí PWM modulu. Požadovaný proud $I_S = 350 \text{ mA}$ pro směrovou funkci umožňuje rozdělení celkového proudu 900 mA do nanejvýše dvou paralelních LED větví. Rovnice 3 definuje procentuální hodnotu činitele plnění PWM modulu D_S pro směrovou funkci tak, aby byl zajištěn světelný tok ϕ_S definovaný v tabulce 3. Nejprve je však nutné zjistit hodnotu světelného toku ϕ_{S450} při 450 mA , který bude tlumen na požadovaných $\phi_S = 70 \text{ lm}$ (rovnice 2).

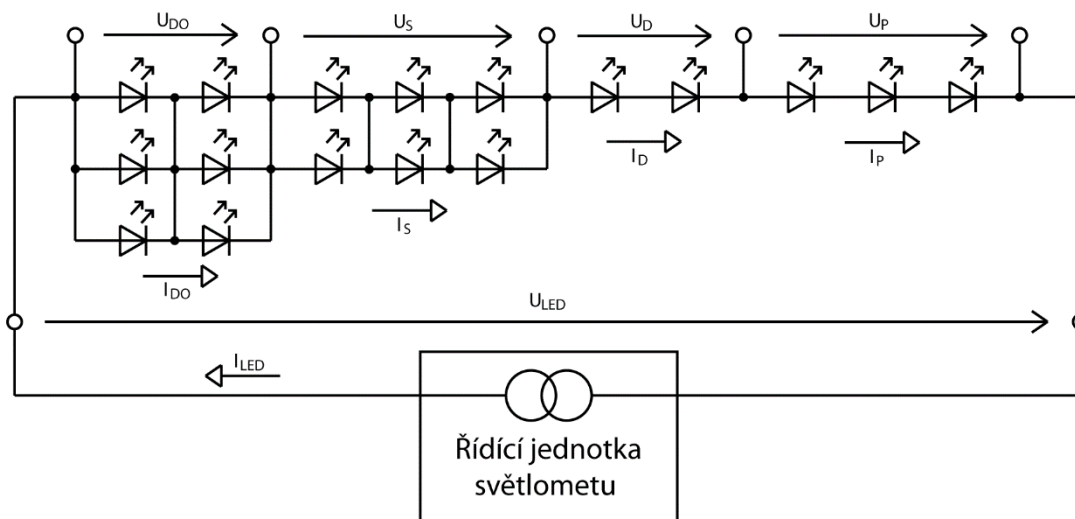
$$\phi_{S450} = \sigma_{IS450} \cdot \sigma_{TS} \cdot \phi_{NOMS} = 0,55 \cdot 0,9 \cdot 175 = 87 \text{ lm} \quad (2)$$

$$D_S = \frac{\phi_S}{\phi_{S450}} \cdot 100 = \frac{70}{87} \cdot 100 = 80,5 \% \quad (3)$$

Požadované tlumení světelného toku denního osvětlení pro funkci obrysového světla bude zajišťovat PWM modul s činitelem plnění $D_{OS} = 10 \%$. Alternativní možností tlumení světelného toku je snižování proudu, tekoucího přes LED. Důvodem, který nedovoluje použití druhé metody, je změna vlnové délky LED v závislosti na protékajícím proudu, čímž by docházelo ke změně barvy na funkcích s tlumeným světelným tokem. V případě aplikace LED světlometu by barevné neshody funkcí byly postřehnutelné lidským okem a tedy nežádoucí.

Z výše uvedených informací lze sestavit schématickou podobu zapojení LED modulů a jejich vzájemného propojení (obrázek 14). Moduly potkávacího a dálkového

světla jsou složeny ze sériově spojených dvoj-čipových LED. Modul denního svícení a směrového světla tvoří dvě serio-paralelní matice LED. Na základě velikosti proudů a jejich dělení je denní osvětlení rozděleno na tři paralelní větve. Při celkovém počtu šesti LED musí být v každé větvi zapojeny dvě LED sériově. Směrové světlo, také s celkovým počtem šesti LED je tvořeno dvěma paralelními větvemi se třemi sériovými LED v každé z nich. Aby byla zajištěna distribuce stejného celkového proudu do všech funkcí, jsou navzájem propojeny sériově.



Obrázek 14: Zapojení LED

Rovnice 4 ukazuje výpočet celkového maximálního napětí U_{LED} , kterého musí řídicí jednotka na výstupních svorkách dosáhnout. Hodnota je dána součtem propustných napětí (tabulka 3) všech sériově zapojených LED.

$$U_{LED} = U_P + U_D + U_{DO} + U_S = (3 \cdot 7,4) + (2 \cdot 7,4) + (2 \cdot 3,45) + (3 \cdot 3,7) = 55V \quad (4)$$

3.3 Syntéza obvodového řešení řídicí jednotky

Na základě stanovení maximálního výstupního napětí U_{LED} a proudu I_{LED} lze blokově navrhnout podobu obvodového řešení (obrázek 15). Vhodnou metodou pro řízení LED modulů je využití spínaného zdroje s konstantním proudovým výstupem 900 mA a regulovatelným napětím v rozsahu 0 – 55 V. Spínaný zdroj s topologií "BUCK-BOOST" vyhovuje nejlépe požadovaným parametrům, protože bude schopen zajistit dostatečné výstupní napětí až do 55 V pro celý rozsah vstupních napětí $U_{IN} = 9 - 16 V$. Zároveň musí zajistit snížení napětí při aktivaci jediné funkce například na hodnotu $U_{DO} = 6,9 V$ a vstupním napětí 16 V.

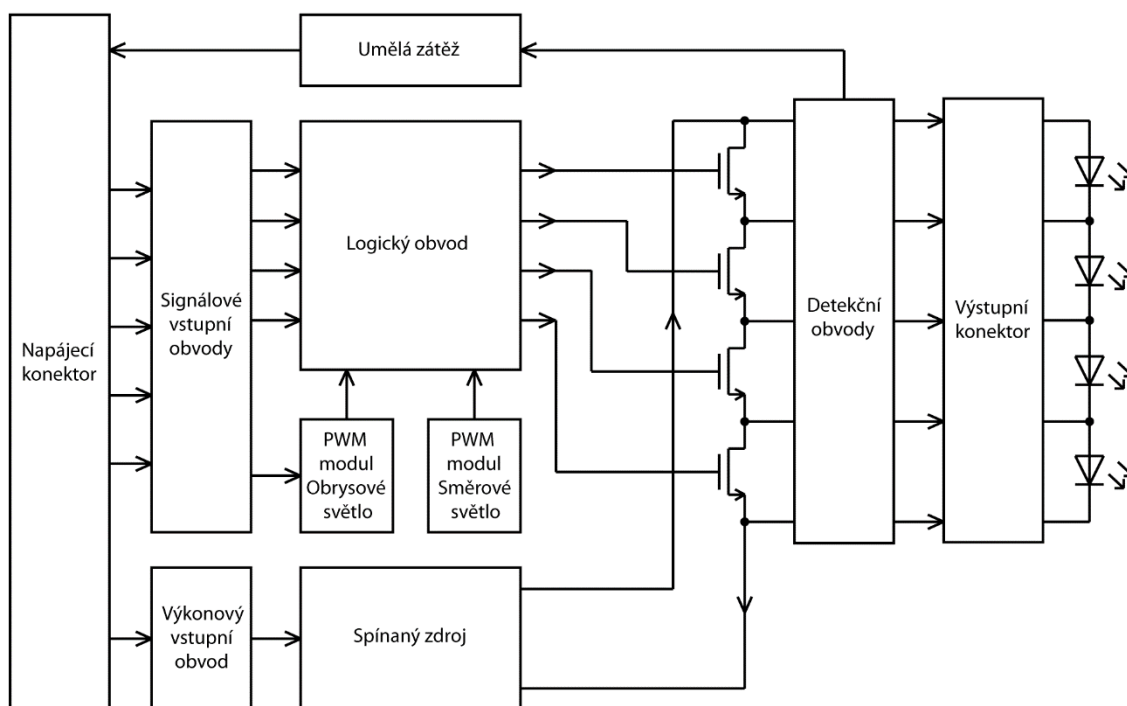
Spínaný zdroj bude vyžadovat přísun značného výkonu z akumulátoru, zprostředkovaný řídicí jednotkou automobilu. Výkonové přizpůsobení, filtraci a ochranu zajistí trvale napájení, výkonový vstupní obvod. Každý ze signálových vstupů bude také vybaven vlastním signálovým vstupním obvodem.

Ovládání funkcí, zapojených ve čtyřech sériových LED maticích, které jsou řízeny jedním proudovým zdrojem, bude provedeno postupným zkratováním pomocí MOS

tranzistorů. To znamená, že stálý proud bude produkovat výstupní napětí v závislosti na tom, kolik ze čtyř zkratovacích tranzistorů bude deaktivováno. Při deaktivaci všech funkcí jsou aktivovány všechny čtyři zkratovací tranzistory a protékající proud $I_{LED} = 900\text{ mA}$ na nich produkuje napětí 0 V . V opačném případě, při aktivaci všech funkcí jsou zkratovací tranzistory deaktivovány a celý proud protéká přes LED. Výhodou tohoto řešení je i možnost připojení PWM modulu, který bude aktivovat zkratovací tranzistory s požadovaným činitelem plnění. Jak bylo uvedeno výše, řídicí jednotka bude obsahovat dva PWM moduly, pro splnění funkce směrového a obrysového světla.

Každá z funkcí bude vybavena detekčním obvodem. V případě rozpojení LED stringu vlivem zničení LED musí dojít k okamžitému vypnutí funkce. Skrze detekční pin na vstupním konektoru bude tento stav signalizován pomocí obvodu umělé zátěže přímo řídicí jednotce automobilu.

Všechny bloky budou navzájem řízeny logickým ovládacím obvodem, který bude sbírat informace ze vstupních, detekčních obvodů a PWM modulů, na základě kterých bude řídit zkratování, neboli vypínání funkcí pomocí výstupních MOS tranzistorů.



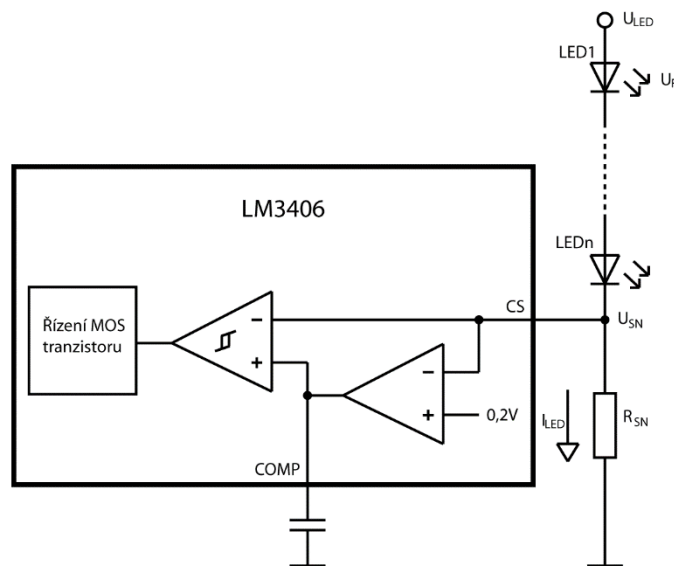
Obrázek 15: Blokové schéma řídicí jednotky

Během vývoje řídicí jednotky byl spínaný zdroj topologie "BUCK-BOOST" rozdělen na dva separátní měniče: stálý proudový výstup zajišťuje snižující "BUCK" měnič, který je napájen ze spínaného zdroje s konstantním napětíovým výstupem typu "BOOST". Důvod byl ten, že při použití původního spínaného zdroje docházelo k přetěžování LED proudovými špičkami v důsledku postupného zvyšování napětí při připínání jednotlivých funkcí. Zpětnovazební smyčka v měniči typu "BUCK-BOOST" nebyla dostatečně rychlá na to, aby při zvyšování napětí precizně regulovala výstupní proud. V případě rozdělení měničů je maximální napětí generováno spínaným zdrojem "BOOST" trvale a měnič typu "BUCK" toto napětí přepíná podle velikosti připojené zátěže.

3.4 Proudový měnič BUCK (LM3406)

Hlavním regulačním obvodem řídicí jednotky je proudový spínaný zdroj v topologii měniče "BUCK". Hodnota nominálního proudu byla vypočítána na $I_{LED} = 900 \text{ mA}$ a napětí může nabývat hodnot $U_{LED} = 0 - 55 \text{ V}$. Byl vybrán integrovaný obvod LM3406 v pouzdře TSSOP14 od firmy Texas Instruments, navržený pro aplikaci v automobilovém průmyslu. Obvod má na čipu integrovaný spínací MOS tranzistor a je vybaven i ochranou proti teplotnímu přetížení.

Základní princip zpětnovazební smyčky (obrázek 16), která řídí velikost výstupního proudu je porovnávání úbytku napětí na rezistoru R_{SN} zařazeného do cesty výstupního proudu s napětím na externí kapacitě připojené k pinu č. 9 "COMP". Napětí vzniká nabíjením kondenzátoru chybovým proudem, který je přímo úměrný rozdílu vstupních napětí transkonduktančního zesilovače, tedy napěťové reference $U_{REF BU} = 0,2 \text{ V}$ a napětí na rezistoru R_{SN} připojeného k pinu "CS". To znamená, že spínací MOS tranzistor spíná a přivádí energii vstupního napětí na cívku, pokud je výstupní proud chybového zesilovače tak velký, že nabíjí externí kapacitu C_{COMP} na napětí větší než je velikost napětí vzniklého výstupním proudem na odporu R_{SN} .



Obrázek 16: Zpětnovazební smyčka obvodu LM3406, [7]

Z rovnice 5 a z velikosti požadovaného proudu $I_{LED} = 900 \text{ mA}$ je s pomocí napěťové hodnoty napětí reference $U_{REF BU} = 0,2 \text{ V}$ možné stanovit velikost odporu R_{SN} .

$$R_{SN} = \frac{U_{REF BU}}{I_{LED}} = \frac{0,2}{0,9} = 0,222 \Omega \quad (5)$$

Výstupní proud $I_{LED} = 900 \text{ mA}$ je určující i pro výběr výkonových komponentů tvořících typické uspořádání topologie "BUCK". Jako usměrňovací prvek byla vybrána rychlá spínací Schottkyho dioda NRVBS3100T3G s maximální proudovou zatížitelností 3 A v celém teplotním rozsahu. MOS tranzistor je integrován přímo na čipu a jeho source, je vyveden na pin "SW". Pro definici indukčnosti spínací cívky je nutné znát další parametry jako vstupní napětí nebo spínací frekvenci.

Obvod LM3406 neobsahuje interní časovač pro nastavení spínací frekvence f_{BU} . Minimální doba vypnutí MOS tranzistoru $t_{OFF BU} = 230 \text{ ns}$ je pevně dána interním nastavením integrovaného obvodu a pro maximální činitel plnění D_{BU} je spínací frekvence automaticky dopočítána. Výstupní napětí je pak regulováno podle poměru mezi dobou zapnutí a vypnutí MOS tranzistoru. V tomto případě byla zvolena hodnota činitele plnění měniče "BUCK" $D_{BU} = 95 \%$. Maximální možná velikost spínací frekvence je vypočítána v rovnici 6. Pokud by byla frekvence vyšší, nedocházelo by k dostatečnému nabití cívky vlivem minimální doby vypnutí MOS tranzistoru $t_{OFF BU}$.

$$f_{BU} = t_{OFF BU} \cdot \frac{1}{1-D_{BU}} = 230 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{1}{1-0,95} = 217,4 \text{ kHz} \quad (6)$$

Nastavení spínací frekvence je detailněji popsáno v katalogovém listu. Provádí se rezistorem zapojeným mezi vstupní napájení a pin č. 10 "RON". Jeho velikost je určena pomocí rovnice 7:

$$R_{ON} = \frac{1}{1 \cdot 10^{-11} \cdot f_{BU}} = \frac{1}{1 \cdot 10^{-11} \cdot 217,4} = 460 \text{ k}\Omega \quad (7)$$

Při vytváření konkrétní schématické podoby měniče (obrázek 17) bylo potřeba upravit část obvodu pro nastavení spínací frekvence. Aplikace v automobilovém průmyslu nedovoluje použití rezistorů větších než $100 \text{ k}\Omega$ z důvodu velkého rozptylu hodnoty odporu vlivem vlhkosti. Z tohoto důvodu byl rezistor R_{ON} nahrazen odporovým děličem, tvořeným rezistory R_{118} a R_{122} . Ty nastavují stejnou napětěvou úroveň $1,68 \text{ V}$ jako rezistor R_{ON} podle doporučeného katalogového zapojení. Hodnota odporu rezistoru R_{118} byla stanovena na $82 \text{ k}\Omega$ a hodnota R_{122} byla nastavena experimentálně na $3 \text{ k}\Omega$.

Podle rovnice 8, použité z katalogového listu, lze stanovit velikost vstupního napětí $U_{IN BU}$, které se připojuje na piny č. 12, 13 a 14 "VIN" a je nezbytné pro správnou funkci měniče. Výpočet zahrnuje vliv doby vypnutí spínacího tranzistoru t_{OFF} , úbytek na spínacím tranzistoru $U_{MOS BU}$ a úbytek na diodě $U_{D BU}$. Úbytek napětí na MOS tranzistoru je vypočítán jako součin procházejícího proudu I_{LED} a jeho odporu v sepnutém stavu $R_{DS BU}$. Hodnoty $U_{D BU} = 0,65 \text{ V}$ a $R_{DS BU} = 0,75 \Omega$ byly odečteny z katalogových listů.

$$U_{IN BU} = \frac{U_{LED} + U_{D BU} + (D_{BU} \cdot U_{MOS BU}) + (D_{BU} \cdot U_{D BU})}{D_{BU}} = \frac{U_{LED} + U_{D BU} + (D_{BU} \cdot R_{DS BU} \cdot I_{LED}) + (D_{BU} \cdot U_{D BU})}{D_{BU}} = \frac{55 + 0,65 + (0,95 \cdot 0,75 \cdot 0,9) + (0,95 \cdot 0,65)}{0,95} = 59,9 \text{ V} \quad (8)$$

Při volbě vstupního napětí měniče $U_{IN BU}$ musí být zohledněn absolutní limit napětí na pinech "VIN" obvodu LM3406, $U_{MAX BU} = 75 \text{ V}$.

Pro definici posledního výkonového prvku, spínací cívky, je rozhodující povolená velikost zvlnění výstupního proudu δI_{LED} . Výrobce LED doporučují, aby tato hodnota nepřekračovala $5 - 20 \%$. To znamená, že zvlnění nesmí překročit hodnotu $\Delta I_{LED} = 0,18 \text{ A}$. Výpočet indukčnosti cívky L_2 podle katalogového listu ukazuje rovnice 10. V rovnici se vyskytuje parametr t_{ON} , jehož hodnota se rovná času sepnutí MOS tranzistoru při maximálním zatížení $U_{LED} = 55 \text{ V}$. Jeho výpočet popisuje rovnice 9.

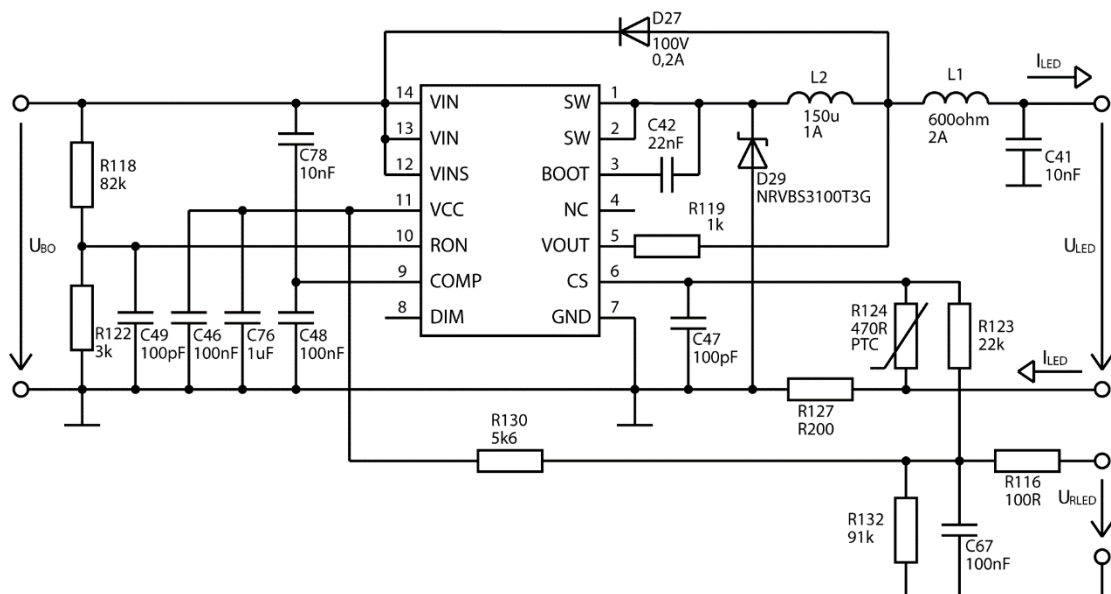
$$t_{ON} = 1 \cdot 10^{-11} \cdot R_{ON} \cdot \frac{U_{LED}}{U_{IN BU}} = 1 \cdot 10^{-11} \cdot 460 \cdot 10^3 \cdot \frac{55}{59,9} = 4,22 \mu\text{s} \quad (9)$$

$$L_2 = \frac{U_{IN BU} - U_{LED}}{\Delta I_{LED}} \cdot t_{ON} = \frac{59,9 - 55}{0,18} \cdot 4,22 \cdot 10^{-6} = 114 \mu\text{H} \quad (10)$$

Nutnou součástí řídicí jednotky je i regulační obvod, který umožní snižování výstupního proudu, protože výrobci LED nedokáží deklarovat, že parametry LED budou po celou dobu výroby světloometu stejné. Zpravidla se uvažují tři rozsahy světelných toků. Velikost proudu $I_{LED} = 900 \text{ mA}$, vypočítaného v kapitole 3.1 byla určena pro nejhorší rozsah světelného toku LED v současné době. Nejjednodušším způsobem, jak informovat řídicí jednotku o selekci rozsahu světelného toku na LED modulech, je připojení externího nastavovacího rezistoru. Ten se osazuje spolu s LED a řízením proudu řídicí jednotky je zajištěno, že i v případě rozdílného rozsahu světleného toku je aktuální světlený tok stejný. Součástí takového obvodu bývá i teplotní kompenzace, která má za úkol regulovat výkon řídicí jednotky a LED tak, aby nedošlo k jejich zničení vlivem vysokých teplot. Jako řídicí prvek, použitý pro teplotní kompenzaci výkonu byl vybrán termistor PRF18BC471QS5RB s kladným teplotním součinitelem odporu. Specifikace určuje, že řídicí jednotka musí být provozuschopná v rozsahu teplot od -40°C do 105°C , ale není nutné, aby funkce světloometu plnily i požadovaný světelný výkon. Vybraný termistor vykazuje stabilní hodnotu odporu 470Ω v rozsahu od -40 do 80°C , potom začne prudce narůstat. Při 100°C je jeho hodnota $5 \text{ k}\Omega$. Cílem aplikace termistoru je snížení proudu I_{LED} , který teče i přes rezistor R_{SN} . Z Ohmova zákona vyplývá, že pro snížení proudu I_{LED} musí dojít ke snížení úbytku napětí na tomto rezistoru, a to například tím, že se mezi rezistor R_{SN} a nastavovací pin "CS", s prahovou hodnotou $U_{REF BU} = 200 \text{ mV}$, zařadí právě termistor R_{124} . Vlivem rostoucí teploty se bude zvyšovat odpor termistoru a tedy i úbytek napětí. Při volbě $R_{SN} = 200 \text{ m}\Omega$ (ve schématu R_{127}) je podle rovnice 5 zřejmé, že do termistoru musí být injektován proud o definované velikosti tak, aby napětí U_{R127} bylo $0,18 \text{ V}$, čímž bude dosaženo nominálního proudu $I_{LED} = 900 \text{ mA}$. Za tímto účelem bude využito napěťové reference 7 V na pinu č. 11 "VCC", kterou integrovaný obvod LM3406 disponuje. S pomocí napěťového děliče tvořeného rezistory R_{130} a R_{132} , určuje rezistor R_{123} velikost injektovaného proudu do termistoru I_{R124} . Při volbě $R_{123} = 22 \text{ k}\Omega$ pak bude velikost proudu I_{LED} záviset jen na velikosti napětí vytvořeného napěťovým děličem. Připojováním externího rezistoru R_{LED} paralelně k R_{132} lze napěťový dělicí poměr měnit a tím nastavit požadovaný proud příslušející rozsahu světelného toku. Se snižující se hodnotou R_{LED} bude napětí klesat, injektovaný proud také a výstupní proud I_{LED} naopak narůstat. V případě nulového odporu rezistoru R_{LED} (nebo zkratu) bude nastavený proud maximální. Rezistor R_{116} , který je s R_{LED} spojen sériově, byl do obvodu doplněn za účelem omezení maximálního proudu na definovanou hodnotu. Uvedený postup výpočtu proudu I_{LED} matematicky popisuje rovnice 11.

$$I_{LED} = \frac{U_{REF BU} - \left(\frac{U_{VCC}}{R_{130} + \frac{R_{132}(R_{116} + R_{LED})}{R_{132} + (R_{116} + R_{LED})}} - \frac{R_{132}(R_{116} + R_{LED})}{R_{132} + (R_{116} + R_{LED})} U_{REF BU} \right)}{R_{127}} \quad (11)$$

Dioda D_{27} zajišťuje, že výstupní napětí nikdy nepřekročí velikost vstupního napětí, ani v případě rozpojení zátěže na výstupu obvodu. Pin č. 3 "BOOT" slouží k připojení externí kapacity podle katalogového zapojení a je součástí "BOOTSTRAP" obvodu, který vytváří kladné napětí potřebné pro sepnutí interního, N kanálového MOS tranzistoru. Kondenzátor C_{78} byl doplněn dodatečně, pro zajištění spolehlivého zapnutí obvodu. Ostatní piny integrovaného obvodu "DIM" a "VCC" nejsou pro jeho funkci využívány a jsou zapojeny podle doporučeného katalogového zapojení.



Obrázek 17: Schéma zapojení měniče "BUCK"

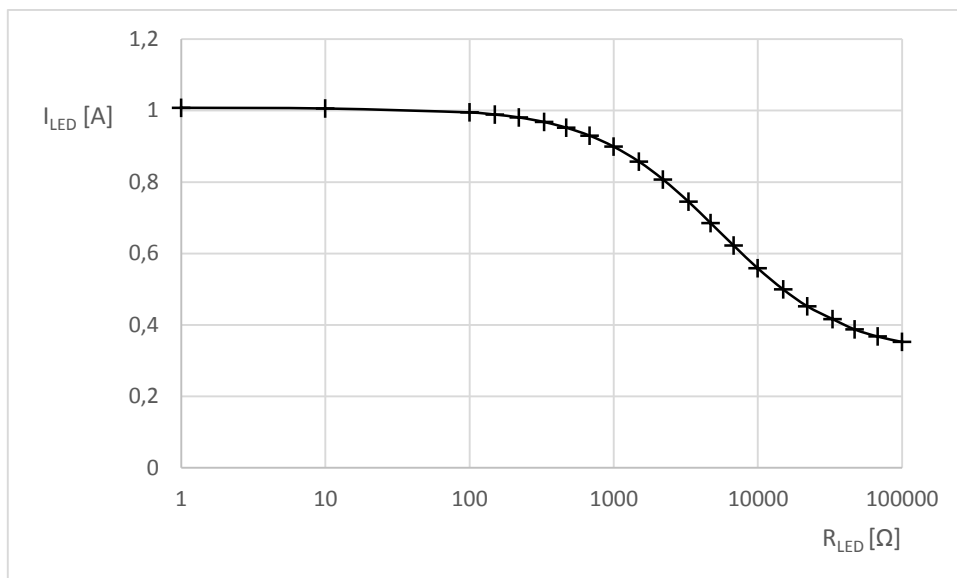
Názorný příklad výpočtu proudu:

$$I_{LED} = \frac{0,2 - \left(\frac{7}{470} \cdot \frac{91000 \cdot (100 + 1000)}{5600 + 91000 + (100 + 1000)} - \frac{91000 \cdot (100 + 1000)}{91000 + (100 + 1000)} \right)^{-0,2}}{0,2} = 0,899 \text{ A} \quad (11)$$

Tabulka 4: Vypočtená závislost výstupního proudu na externím nastavovacím rezistoru

$R_{LED} [\Omega]$	1	10	100	150	220	330	470	680	1000	1500	2200
$I_{LED} [A]$	1,008	1,006	0,995	0,989	0,981	0,968	0,952	0,93	0,899	0,857	0,807

$R_{LED} [\Omega]$	3300	4700	6800	10000	15000	22000	33000	47000	68000	100000
$I_{LED} [A]$	0,745	0,685	0,622	0,558	0,499	0,452	0,416	0,387	0,367	0,352



Obrázek 18: Charakteristika závislosti výstupního proudu na externím nastavovacím rezistoru

3.5 Zvyšující napěťový měnič BOOST (MAX16833)

Funkce snižujícího měniče "BUCK" s proudovým výstupem je závislá na dostatečném a stabilním vstupním napětí. Jeho hodnota $U_{INBU} = 59,9 V$ byla vypočítána jako součet maximálních propustných napětí všech LED a napětí potřebné pro provoz samotného měniče "BUCK", podle rovnice 8. Pro transformaci vstupního napětí v rozsahu $9 - 16 V$ na U_{INBU} je řídicí jednotka vybavena zvyšujícím měničem typu "BOOST". Pro jeho výstupní napětí platí následující rovnice 12:

$$\begin{aligned} U_{MAXBU} &\geq U_{BO} \geq U_{INBU} \\ 75 &\geq U_{BO} \geq 59,9 \end{aligned} \quad (12)$$

Pro realizaci zvyšujícího měniče byl vybrán obvod MAX16833C od firmy Maxim Integrated s nastavitelnou spínací frekvencí až do $1 MHz$ s možností spektrálního rozmítání. Obvod vyžaduje připojení N-kanálového spínacího MOS tranzistoru, který při otevření umožňuje nabíjení spínací cívky. MOS tranzistor je řízen hradlem přes pin "NDRV" a řídicí signál hradla je výstupem zpětnovazebního obvodu, do kterého vstupuje několik parametrů. Maximální činitel plnění signálu s nastavitelnou frekvencí je stanoven na neměnnou hodnotu 94 %, která je dána minimálním časem, potřebným pro nabití kondenzátoru, který řídí elektrodu "gate" spínacího MOS tranzistoru. Řízení činitele plnění zajišťuje klopný obvod typu RS. Jeho aktivace (do úrovně "SET") je provedena s každým taktem spínací frekvence. Deaktivace ("RESET") je podmíněna dvěma stavy. Prvním je dosažení prahového napětí $U_{CS} = 0,418 V$ na pinu "CS", který snímá proud procházející spínací cívkou převedený rezistorem R_{CS} na napětí. Anglicky se tento typ měniče označuje jako "peak-current-mode control". Druhý stav, při kterém se klopný obvod RS resetuje, je vynulování proudu z výstupu chybového transkonduktančního zesilovače. Princip se využívá k řízení výstupní veličiny, v případě "BOOST" měniče s napěťovým výstupem je to napětí a jeho podstata bude vysvětlena dále.

Funkce integrovaného obvodu jsou aktivní, pokud jsou deaktivovány všechny

kontrolní obvody jako například: práh podpětí vstupního napájení na pinu "IN" nastavený na 4,6 V, přepětová ochrana výstupu na pinu "OVP" nebo teplotní přetížení. Funkci obvodu lze stejně tak zakázat nebo přerušit prostřednictvím pinu "PWMDIM".

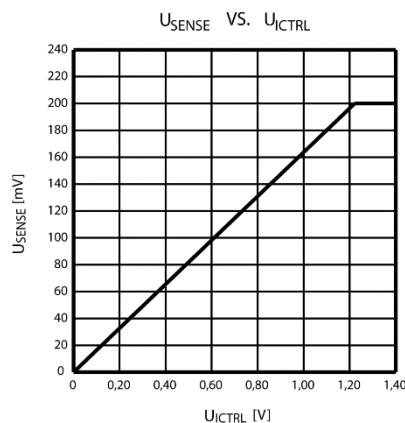
Schématický návrh měniče "BOOST" (obrázek 21) následuje posloupnost uvedenou v katalogovém listu. Vstupní pin "VIN" je blokován kapacitou $C_{43} = 1 \mu F$ a dioda D_8 zamezuje poklesu napětí vlivem vybíjení kapacity C_{43} při testu výpadku napájení na 500 μs . Výpadky napájení jsou součástí testování pulsů při ověřování elektromagnetické kompatibility.

Spínací frekvence $f = 400 \text{ kHz}$ byla odvozená od limitů stanovených pro testování vyzařovaných emisí, protože v rozsahu od 100 kHz do 2 MHz je pouze úzká část spektra okolo 400 kHz, kde pro vyzařovaný signál není definován žádný limit. Frekvence se nastavuje rezistorem zapojeným z pinu "RT/SYNC" proti zemi a velikost jeho odporu byla stanovena podle rovnice 13. Byl vybrán rezistor s hodnotou odporu $R_{126} = 16 \text{ k}\Omega$, při kterém je spínací frekvence $f_{BO} = 433,06 \text{ kHz}$.

$$R_{126} = \frac{6929 \cdot 10^6}{f} = \frac{6929 \cdot 10^6}{400\,000} = 17,322 \text{ k}\Omega \quad (13)$$

Pin číslo 1 "LFRAMP" umožňuje rozmítání spínací frekvence. Cílem rozmítání je změna spínací frekvence ve stanoveném rozsahu, za účelem rozložení spektra vyzařovaného signálu, vznikajícího v důsledku spínání. Velikost rozmítání lze nastavovat rezistorem zapojeným proti pinu "RT/SYNC". Velikost rozmítacího rezistoru $R_{121} = 47 \text{ k}\Omega$, byla určena dodatečně během testování tak, aby vyzařované signály s vyšší harmonickou frekvencí nepřekračovaly limity určené specifikací.

Pin č. 15 "VCC" je zdroj referenčního napětí 7 V, které využívají obvody a komparátory uvnitř integrovaného obvodu. Podle katalogového doporučení je k pinu připojen keramický kondenzátor $C_{76} = 1 \mu F$. V této aplikaci je pin využíván i jako napětěová reference pro přesné nastavení výstupního napětí. Spínaný zdroj reguluje výstupní napětí tak, aby vstupní napětí diferenčního zesilovače U_{SENSE} , tedy napětí mezi piny "ISENSE+" a "ISENSE-" bylo přesně rovno napětí U_{ICTRL} , lineárně násobeného koeficientem 6,15 (obrázek 19). Jestliže napětěový dělič, složený z rezistorů R_{125} a R_{142} a napájený z napětěové reference 7V, nastavuje na pinu "ICTRL" napětí $U_{ICTRL} = 1,23 \text{ V}$, pak podle grafu na obrázku 19 vyplývá, že napětí mezi piny "ISENSE+" a "ISENSE-" řídí napětí na rezistoru R_{134} na hodnotu $U_{SENSE} = 200 \text{ mV}$. Jednoduchým výpočtem lze z požadované hodnoty napětí U_{BO} určit hodnoty odporů napětěového děliče $R_{134} = 300 \Omega$ a $R_{140} = 91 \text{ k}\Omega$. Nastavená velikost výstupního napětí tedy bude (rovnice 14):



Obrázek 19: Závislost U_{SENSE} vs. U_{ICTRL}

$$U_{BO} = \frac{U_{SENSE}}{R_{134}} \cdot (R_{134} + R_{140}) = \frac{0,2}{300} \cdot (300 + 91000) = 60,87 \text{ V} \quad (14)$$

Rezistor R_{137} je podle doporučení z katalogového listu zvolen 100Ω a omezuje proud z pinu "ISENSE-" při zkratu na výstupu.

Stejným způsobem je vypočítán také dělič, který výstupní napětí převádí na pin ochrany proti přepětí "OVP". K vypnutí obvodu dojde, pokud napětí na pinu překročí hodnotu $U_{OVP} = 1,23 V$. Při zvolených hodnotách $R_{139} = 56 k\Omega$ a $R_{159} = 1 k\Omega$ je prahové výstupní napětí:

$$U_{BO MAX} = \frac{U_{OVP}}{R_{159}} \cdot (R_{152} + R_{139}) = \frac{1,23}{1000} \cdot (1000 + 56000) = 70,11 V \quad (15)$$

Návrh výkonové části spínaného zdroje se odvíjí od výpočtu maximálního činitele plnění. Pro jeho výpočet bylo potřeba definovat přesný typ výkonových komponentů. Ty byly vybírány na základě předpokládaných proudů a napětí, odvozených z výstupního napětí U_{BO} a výstupního výkonu na LED. Například proud, kterým se bude nabíjet cívka, byl vypočítán rovnicí 17 tak, aby při minimálním vstupním napětí $U_{IN MIN} = 9 V$ dokázala cívka zabezpečit potřebný výkon. Nejprve tedy bylo potřeba určit výstupní výkon měniče "BOOST", kde byla zohledněna předpokládaná účinnost měniče "BUCK" $\eta_{BU} = 95\%$:

$$P_{BO} = P_{BU} \cdot \eta_{BU} = U_{LED} \cdot I_{LED} \cdot 1,05 = 55 \cdot 0,9 \cdot 1,05 = 51,98 W \quad (16)$$

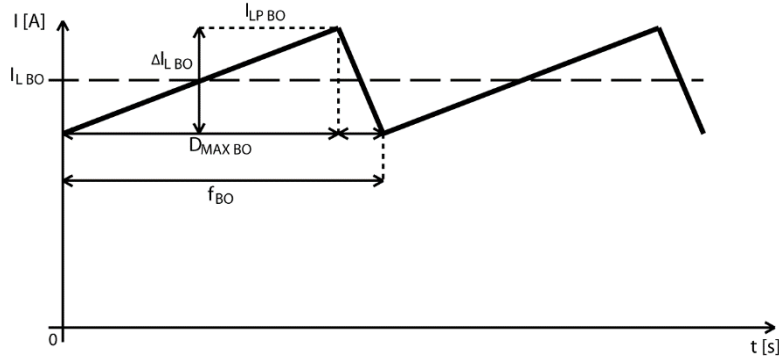
$$I_{L BO} = \frac{P_{BO}}{U_{IN MIN}} \cdot \eta_{BO} = \frac{51,98}{9} \cdot 1,2 = 6,94 A \quad (17)$$

Ve výpočtu byla zahrnuta účinnost měniče "BOOST" $\eta_{BO} = 80\%$. Z vypočítané hodnoty $I_{L BO} = 6,94 A$ vyplývá, že výkonové prvky musí být dimenzované alespoň na proud $10 A$. Byla vybrána rychlá spínací, Schottkyho dioda D_{30} V10P10 s maximálním závěrným napětím $100 V$. Při volbě spínacího tranzistoru s proudovým zatížením $10 A$ a maximálním napětí U_{DS} přesahující $60 V$ je potřeba zohlednit hodnotu odporu $R_{DS BO}$, který má velký vliv na tepelné ztráty při spínání. Byl vybrán N-MOS tranzistor Q_{38} SQD25N15, s odporem $R_{DS BO} = 52 m\Omega$. Ve schématu je k tranzistoru připojen filtrační člen tvořený rezistorem R_{128} a C_{51} . Hodnoty součástek budou zvoleny při experimentálním testování na funkčním vzorku, na základě jejich vlivu na účinnost spínaného zdroje a tepelné ztráty tranzistoru.

Po výběru komponentů lze vypočítat maximální činitel plnění podle rovnice 18, uvedené v katalogovém listu. Hodnota nesmí přesáhnout maximální možný činitel plnění integrovaného obvodu, který je 94% . Napětí na diodě $U_{D30} = 0,48 V$ bylo určeno podle Ampér-Voltové závislosti diody v katalogovém listu:

$$D_{MAX BO} = \frac{U_{BO} + U_{D30} - U_{IN MIN}}{U_{BO} + U_{D30} - U_{Q38}} = \frac{U_{BO} + U_{D30} - U_{IN MIN}}{U_{BO} + U_{D30} - (R_{DS BO} \cdot I_{L BO})} = \frac{60,87 + 0,48 - 9}{60,87 + 0,48 - (0,052 \cdot 6,94)} = 0,86 \quad (18)$$

Volba konkrétního typu cívky závisí kromě proudu také na indukčnosti. Její hodnotu lze vypočítat podle rovnice 21, kde vstupuje parametr maximálního zvlnění. Ten byl zvolen na hodnotu 10% z nabíjecího proudu cívky $I_{L BO}$. Parametry zvlnění $\Delta I_{L BO}$ a špičkový proud $I_{LP BO}$, který je snímán pro řízení výkonu, vysvětluje obrázek 20.



Obrázek 20: Ukázka zvlnění a špičkového proudu procházející cívku měniče "BOOST"

Velikost zvlnění ΔI_{LBO} lze spočítat podle rovnice 19 a špičkový proud I_{LPBO} podle rovnice 20:

$$\Delta I_{LBO} = 2 \cdot (I_{LBO} \cdot 10\%) = 2 \cdot (6,94 \cdot 0,1) = 1,39 \text{ A} \quad (19)$$

$$I_{LPBO} = I_{LBO} + \frac{\Delta I_{LBO}}{2} = 6,94 + \frac{1,39}{2} = 7,64 \text{ A} \quad (20)$$

V rovnici 21 je popsán přibližný výpočet indukčnosti spínací cívky. Byla zvolena cívka s indukčností $L_{BO} = 10 \mu H$ typu IHLP5050FDER100MA1.

$$L_{BO} = \frac{(U_{INMIN} - U_{Q38}) \cdot D_{MAXBO}}{f_{BO} \cdot \Delta I_{LBO}} = \frac{(9 - (0,052 \cdot 6,94)) \cdot 0,86}{433060 \cdot 1,39} = 12,3 \mu H \quad (21)$$

Proud cívku, jehož špičkové hodnoty jsou využívány pro řízení měniče pomocí pinu "CS", je převáděn na napětí s pomocí rezistoru R_{CS} . Hodnota jeho odporu lze spočítat pomocí rovnice 22, uvedené v katalogovém listu. Důležité je odpor R_{CS} dimenzovat tak, aby nebyl přetěžován ani při okamžitém, špičkovém proudu (rovnice 23).

$$R_{CS} = \frac{U_{CS}}{I_{LPBO} + \left(0,75 \cdot D_{MAXBO} \cdot \frac{U_{BO} - 2 \cdot U_{INMIN}}{L_{BO} \cdot f_{BO}}\right)} = \frac{0,418}{7,64 + \left(0,75 \cdot 0,86 \cdot \frac{60,87 - 2 \cdot 9}{10 \cdot 10^{-6} \cdot 433060}\right)} = 29,8 \text{ m}\Omega \quad (22)$$

$$P_{RCS} = I_{LPBO}^2 \cdot R_{CS} = 7,64^2 \cdot 0,0298 = 1,73 \text{ W} \quad (23)$$

Odpor R_{CS} byl složen z osmi paralelních rezistorů $R_{146} \div R_{153}$ s výkonovou zatížitelností 250 mW . Aby bylo dosaženo hodnoty $R_{CS} = 29,8 \text{ m}\Omega$, musí být hodnota odporu osmi paralelně spojovaných rezistorů přibližně osminásobná. Byla vybrána hodnota $R_{146} \div R_{153} = 220 \text{ m}\Omega$. Do výpočtu byl zohledněn i sériový odpor přívodních vodičů, který bude mít u odporů s hodnotami v řádu desítek $\text{m}\Omega$ nezanedbatelný vliv.

Integrovaný obvod je vybaven funkcí nazývanou "kompenzace sklonu". Její podstatou je zavádění pilového, proudového signálu, který na rezistoru R_{144} připojeném mezi pin "CS" a rezistory $R_{146} \div R_{153}$ vytváří pilové napětí. Tento princip se často využívá k potlačení vzniku subharmonických oscilací, ke kterým dochází u spínaných zdrojů, při splnění třech podmínek: činitel plnění větší než 50 %, snímání špičkového proudu cívku ("peak-current-mode control") a nepřetržitý proud cívku který neklesá na nulovou hodnotu ("continuous mode"). Rovnice 24, podle které lze vypočítat odpor rezistoru pro kompenzaci sklonu je taktéž uvedena v katalogovém listu. Byla vybrána hodnota $R_{144} = 3900 \Omega$.

$$R_{144} = \frac{(U_{BO} - 2 \cdot U_{IN\ MIN}) \cdot R_{CS} \cdot 1,5}{2 \cdot L_{BO} \cdot f_{BO} \cdot 50\ \mu A} = \frac{(60,87 - 2 \cdot 9) \cdot 0,0275 \cdot 1,5}{2 \cdot 10 \cdot 10^{-6} \cdot 433060 \cdot 50 \cdot 10^{-6}} = 4083\ \Omega \quad (24)$$

Výstupní kapacita spínaného zdroje "BOOST" musí být volena dostatečně velká, aby nemohlo dojít k oscilacím druhého spínaného zdroje "BUCK". Pro počáteční výpočet minimální kapacity (rovnice 25) je zvolena hodnota maximálního zvlnění napětí 1 % a z toho plyne $\Delta U_{BO} = 0,6087\ V$. Výstupní kapacita byla složena kombinací elektrolytického kondenzátoru $C_{58} = 47\ \mu F$ a keramických kondenzátorů C_{45}, C_{56} s kapacitou $2,2\ \mu F$.

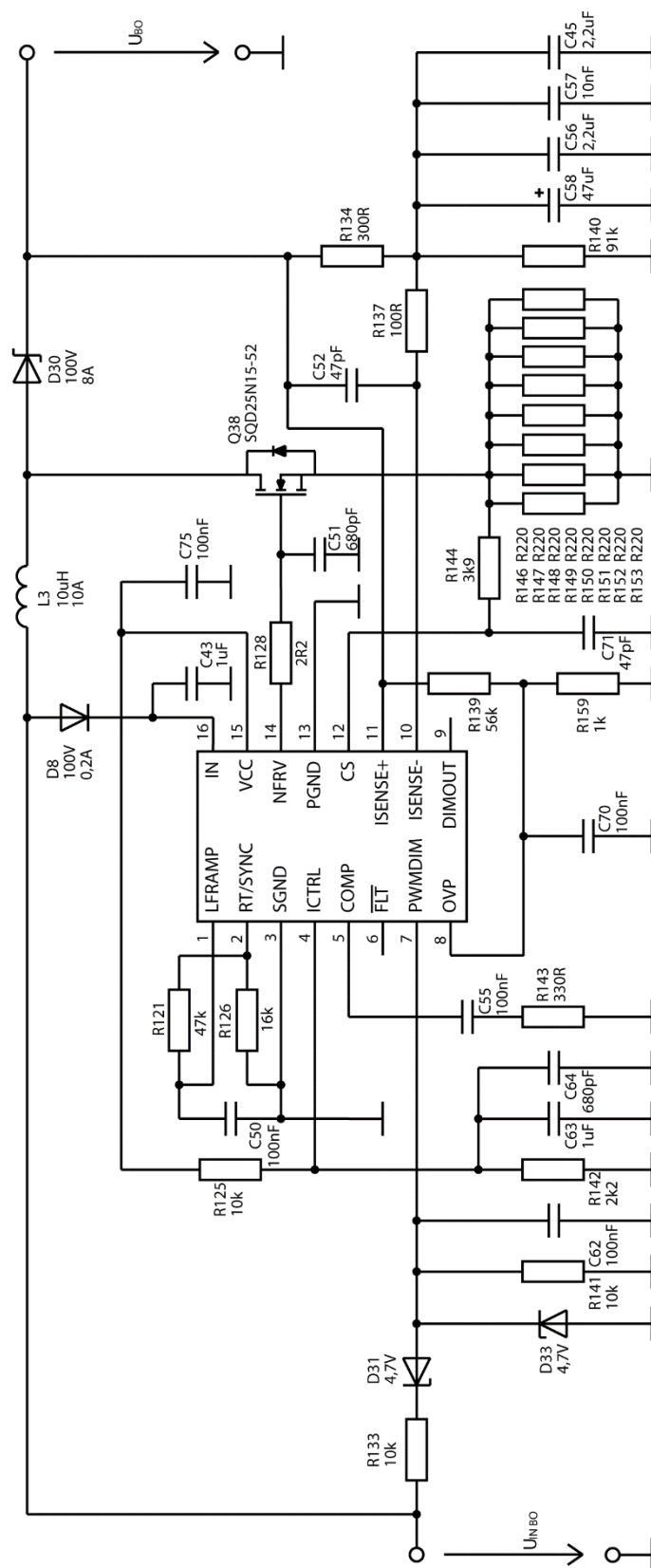
$$C_{BO\ MIN} = \frac{\frac{P_{BO}}{U_{BO}} \cdot 2 \cdot D_{MAX\ BO}}{\Delta U_{BO} \cdot f_{BO}} = \frac{\frac{51,98}{60,87} \cdot 2 \cdot 0,86}{0,6087 \cdot 433060} = 5,57 \cdot 10^{-6}\ F \quad (25)$$

Spínaný zdroj je doplněn ještě o obvod vypnutí při podpětí. Vstup "PWMDIM" je primárně navržen pro PWM modulaci integrovaného obvodu. V tomto zapojení je použitý pro vypnutí obvodu při poklesu vstupního napětí pod $7\ V$. Pokud napětí na pinu "PWMDIM" překročí prahovou hodnotu $U_{PWMDIM} = 1,23\ V$, pak je interně povoleno spínání tranzistoru Q_{38} . Naopak, jestliže napětí klesne pod $1,23\ V$ celý spínaný zdroj vypne. Zvýšení vypínacího napětí z hodnoty $1,23\ V$ na potřebných $7\ V$ zajišťuje bariérové napětí Zenerovy diody, jehož velikost je dána rozdílem hodnot. Do výpočtu je potřeba zahrnout i úbytek napětí na vstupních obvodech a přívodní kabeláži, takže byla vybrána dioda D_{31} se Zenerovým napětím $4,7\ V$. Předřadný rezistor $R_{133} = 10\ k\Omega$ nastavuje diodě pracovní proud. Druhá Zenerova dioda D_{33} omezuje napětí na pinu "PWMDIM", protože nesmí překročit hodnotu $5,1\ V$.

Spínaný zdroj vyžaduje stabilní vstupní napětí, na němž je závislý především proud nabíjející spínací cívku. Stabilní vstupní napětí může zajistit předřazení dostatečné vstupní kapacity. Pro výpočet její minimální hodnoty C_{MIN} podle rovnice 26 je potřeba zohlednit zvlnění vstupního napětí z akumulátoru automobilu nabíjeného alternátorem. Při vstupním napětí $9\ V$ a zvlnění 1 % může být hodnota $\Delta U_{IN} = 90\ mV$.

$$C_{MIN} = \frac{\Delta I_{L\ BO}}{4 \cdot \Delta U_{IN} \cdot f_{BO}} = \frac{1,39}{4 \cdot 0,09 \cdot 433060} = 8,92\ \mu F \quad (26)$$

Vypočítaná vstupní kapacita bude součástí vstupního filtru, popsaného v následující kapitole 3.6.



Obrázek 21: Schéma zapojení měniče "BOOST"

3.6 Vstupní filtr a ochranné obvody

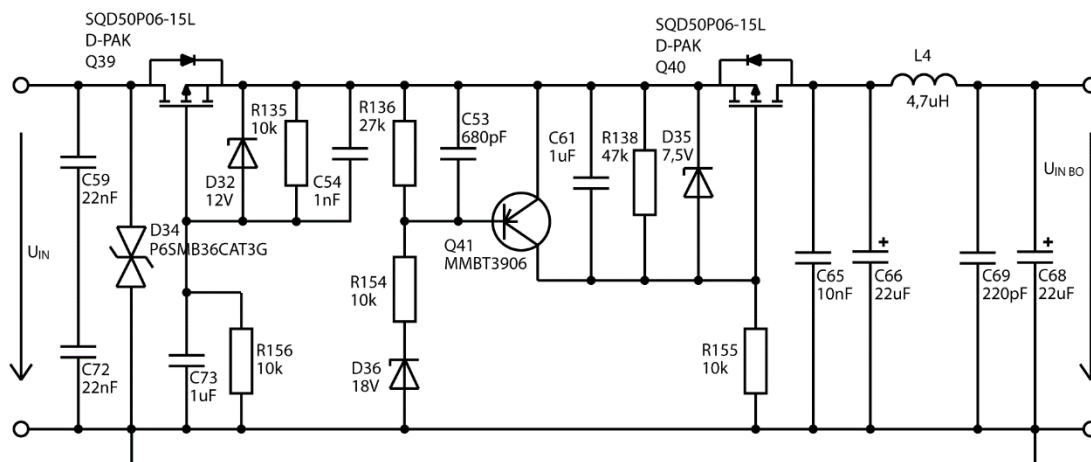
Propojení řídicí jednotky s automobilem skrze vstupní konektor světlometu vyžaduje přizpůsobení napájecích a signálových vstupů, za účelem jejich dalšího využití pro napájení spínaných zdrojů a řízení logických obvodů.

Výkonová vstupní část, která má za úkol zajistit přísun energie pro LED moduly přes měniče "BOOST" a "BUCK" je schematicky znázorněna na obrázku 22. Z automobilu je trvalé napájení přivedeno k napájecímu konektoru řídicí jednotky, k pinům č. 7 a 8. Sériově spojené kondenzátory C_{59} a C_{72} se umísťují přímo ke konektoru, navzájem kolmo vedle sebe do tvaru L. Toto spojení zajišťuje větší bezpečnost s ohledem na mechanické namáhání desky, protože i při zničení a následnému zkratu jednoho kondenzátoru nedojde ke zkratu napájecího vstupu se zemí. Jejich úkolem je filtrovat vysokofrekvenční rušení, které se může dostat až na vstup elektroniky. Komponent D_{34} je polovodičový transil, který filtruje rychlé napěťové impulsy. Při překročení prahového napětí transilu jsou veškeré signály s vyšším napětím svedeny do země. V tomto případě je prahové napětí 36 V.

Unipolární tranzistor Q_{39} typu SQD50P06 s polaritou "P" nahrazuje funkci usměrňovací diody, pro ochranu proti přepólování. Výhodou použití tranzistoru je jeho malý odpor R_{DS} v sepnutém stavu, podle katalogového listu 20 m Ω . Při maximálním výkonu $P_{BO} = 51,98$ spočítaném v rovnici 16 a maximálním proudovém zatížení tranzistoru, tedy při $U_{IN\ MIN} = 9\ V$ je úbytek na tranzistoru přibližně 120 mV. Rezistor R_{156} má za úkol otvírat tranzistor připojením jeho elektrody gate k potenciálu země, čímž vytváří rozdíl napětí mezi elektrodami gate a source. Zároveň rezistor omezuje proud do ochranné diody D_{32} , pokud vstupní napětí překračuje její Zenerovo napětí. Rezistor R_{135} zajišťuje vybíjení vstupní kapacity tranzistoru za účelem jeho zavření.

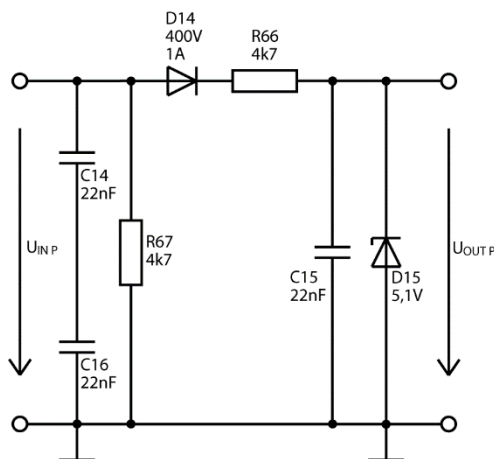
Druhý unipolární tranzistor Q_{40} typu SQD50P06 je součástí obvodu, jehož primární úkolem je zajistit, aby nedocházelo k velkým proudovým špičkám při zapínání funkcí, které mohou přetěžovat řídicí jednotku automobilu. Pomalý náběh proudu zajišťuje kondenzátor C_{61} s kapacitou 1 μF tím, že pomalu zvyšuje napětí mezi elektrodami "gate" a "source" a postupně otevírá tranzistor Q_{40} . Sekundární úkol obvodu je ochrana trvalého přepětí. Při překročení Zenerova napětí diody D_{36} , ke kterému dojde při překročení hodnoty vstupního napětí okolo 18 V, začne protékat proud rezistorem R_{136} , který způsobí zavření unipolárního tranzistoru Q_{40} vlivem otevření bipolárního tranzistoru Q_{41} .

Vstupní filtr, tvořený cívkou L_4 a kapacitami C_{65} , C_{66} , C_{68} a C_{69} přivádí na vstup spínaných zdrojů stabilní napětí. Podle výpočtu v rovnici 26 byla vybrána kapacita kondenzátoru $C_{68} = 22\ \mu F$. Cívka L_4 tvoří obousměrný filtr, využívaný pro odolnost vůči rušení indukovaného do kabeláže a zároveň zabraňuje rušení šířicímu se po vodičích od spínaných zdrojů v důsledku jejich spínání. Dělicí kmitočet cívky je určen startovní frekvencí $f_s = 150\ kHz$ při testování rušení šířícím se po vodičích, podle kterého byla vybrána cívka $L_4 = 4,7\ \mu H$.



Obrázek 22: Schéma zapojení vstupního ochranného obvodu

Každá z funkcí (potkávací, dálkové, směrové, obrysové světlo a denní osvětlení) je řízena signálem z automobilu. Tyto vstupní signály jsou přivedeny na vstupní konektor řídicí jednotky a řídí obvod tranzistorové logiky, která ovládá zapínání, vypínání a regulaci výkonu LED. Každý vstup tak musí být opatřen vlastním vstupním obvodem. Pro demonstraci bylo na obrázku 23 vybráno schematické řešení vstupního obvodu směrového světla.



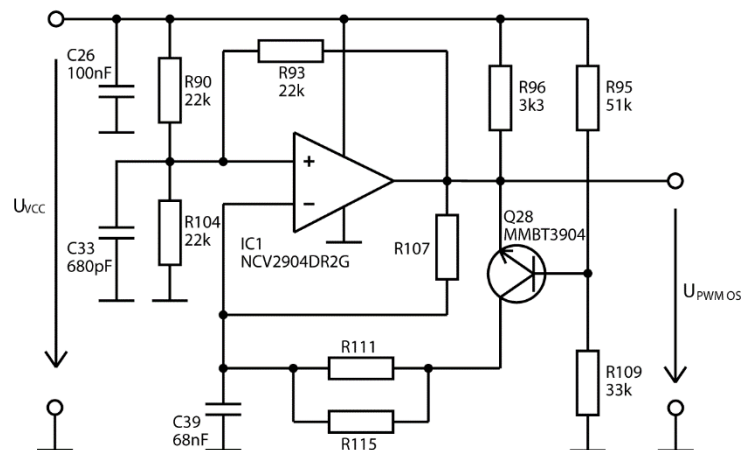
Obrázek 23: Schématické zapojení signálového vstupního obvodu

Dva sériové kondenzátory C_{11} , C_{13} na vstupu plní stejnou funkci jako v případě výkonového vstupního obvodu. Dioda D_{11} zajišťuje ochranu proti přepólování. Transil je v tomto případě nahrazen Zenerovou diodou D_{12} , která zároveň přizpůsobuje napěťovou úroveň vstupního signálu pro tranzistorový logický obvod. Rezistor R_{56} nastavuje pracovní proud Zenerovou diodou a k blokování vysokofrekvenčního šumu slouží C_{12} . Rezistor R_{61} vytváří svod pro zbytkové proudy, aby nemohlo dojít k nesprávné, samovolné aktivaci funkce.

3.7 PWM generátor

Kolimátorový optický systém, použitý pro denní osvětlení i obrysové světlo, vyžaduje možnost snížení světelného toku každé LED tak, aby byly splněny požadované světelné výkony obou funkcí. Stejný princip snížení světelného toku vyžaduje i směrové světlo, kvůli požadavku na přesnou hodnotu světelného výstupu funkce. V kapitole 3.1 bylo stanoveno, že snižování toku zabezpečí PWM moduly s činiteli plnění $D_{OS} = 10\%$ a $D_S = 80\%$. Oba PWM moduly budou připojeny k logickému ovládacímu obvodu, který bude přes výstupní část řídicí jednotky řídit výkon přenášený do zátěže, tedy do LED modulů. Pro napájení obou PWM modulů bude využito stabilního 7 V napětí z lineárního regulátoru, kterým disponuje integrovaný obvod MAX16833 na pinu č. 15 "VCC".

Byl navržen PWM modul s komparátorem, který umožňuje nastavení frekvence tlumení na hodnotu $f_{PWM} = 200\text{ Hz}$, tak jak ji specifikuje zákazník. Hodnota výstupního činitele plnění je nastavitelná v rozsahu $50 \div 99\%$. Funkční teplotní rozsah PWM modulu je -40 až $125\text{ }^{\circ}\text{C}$. Z důvodu potřeby dvou PWM modulů byl vybrán duální komparátor typu NCV2904DR2G od výrobce ON Semiconductor. Komparátory jsou integrovány v pouzdře SOIC-8 a rozsah jejich napájecích napětí je $3 \div 32\text{ V}$. Schéma zapojení PWM generátoru, využitého pro funkci tlumení funkce denního osvětlení na obrysové světlo je vidět na obrázku 24.



Obrázek 24: Základní schéma PWM generátoru obrysového světla

Komparátor IC_1 porovnává napětí na obou vstupech a pokud je napětí na invertujícím vstupu vyšší než na neinvertujícím pak stáhne výstupní pin komparátoru k zemi. Výstupní tranzistor komparátoru s otevřeným kolektorem vyžaduje připojení "pull-up" rezistoru R_{96} , který zabezpečuje rozsah hodnot výstupního napětí blízký rozsahu vstupního napětí. Hodnota odporu rezistoru $R_{96} = 3,3\text{ k}\Omega$ je kompromisem mezi hodnotou napájecího proudu ve chvíli, kdy je výstup komparátoru uzemněn a maximálním rozkmitem výstupního napětí, protože výstup z komparátoru je zatížen rezistorem R_{93} a R_{107} a zároveň i vnějším obvodem připojeným k PWM generátoru. Napájecí napětí komparátoru je blokováno kondenzátorem C_{26} .

Kondenzátor C_{39} , který určuje časovou konstantu, se nabíjí z výstupu komparátoru přes rezistor R_{107} a vybíjí se také přes výstup komparátoru, ale tentokrát přes paralelně

spojené rezistory R_{107} a R_{111} , R_{115} díky otevření tranzistoru Q_{28} . Napětí osciluje mezi dvěma prahovými hodnotami kondenzátoru C_{39} , které jsou dány velikostí napájecího napětí a velikostí odporu rezistorů R_{90} , R_{93} a R_{104} . Pokud jsou hodnoty rezistorů nastaveny na stejnou hodnotu $R_{90} = R_{93} = R_{104} = 22 \text{ k}\Omega$, pak prahové hodnoty napětí jsou přibližně $1/3$ a $2/3$ vstupního napětí. Hodnota $22 \text{ k}\Omega$ byla vybrána tak, aby byl co nejvíce potlačen vliv rezistoru R_{96} na prahové úrovně a zároveň aby byla zajištěna nízká spotřeba energie.

Tranzistor Q_{28} , typ MMBT3904, pracuje jako spínač. Pokud je výstup komparátoru v logické úrovni 0, tranzistor sepne. Rezistory R_{95} a R_{109} nastavují pracovní bod tranzistoru. Jejich hodnota je zvolena tak, aby zajistily dostatečné napětí přechodu báze-emitor tranzistoru Q_{28} i bázevý proud potřebný k jeho sepnutí v celém teplotním rozsahu. Zároveň musí být zajištěno nižší napětí přechodu báze-emitor, než minimální prahové napětí na kondenzátoru C_{39} tak, aby se zabránilo toku proudu přes přechod báze-kolektor, pokud je přechod báze-emitor závěrně polarizován. Nejnižší prahové napětí na kondenzátoru U_{C39L} lze spočítat podle rovnice 27:

$$U_{C39L} = \frac{R_{93} \cdot U_{VCC} + R_{90} \cdot U_{CEsat}}{R_{90} + R_{93} + \frac{R_{90} \cdot R_{93}}{R_{104}}} \quad (27)$$

kde U_{CEsat} je saturační napětí komparátoru IC_1 s otevřeným kolektorem výstupního tranzistoru. Pokud uvažujeme, že rezistory R_{90} , R_{93} , R_{104} mají stejnou hodnotu, potom můžeme vzorec zjednodušit na rovnici 28:

$$U_{C39L} = \frac{U_{VCC} + U_{CEsat}}{3} \quad (28)$$

jestliže je $U_{CEsat} \ll U_{VCC}$ pak lze rovnici 28 zjednodušit do tvaru rovnice 29:

$$U_{C39L} = \frac{1}{3} \cdot U_{VCC} = \frac{1}{3} \cdot 7 = 2,33 \text{ V} \quad (29)$$

Nejvyšší prahové napětí na kondenzátoru U_{C39H} je dáno rovnicí 30, která platí pouze za předpokladu zanedbání vlivu rezistoru R_{107} .

$$U_{C39H} = U_{VCC} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_{90} \cdot (R_{93} + R_{96})}{R_{104} \cdot (R_{90} + R_{93} + R_{96})}} \quad (30)$$

rovnici 30 lze opět zjednodušit na rovnici 31 za předpokladu $R_{90} = R_{93} = R_{104} = R$:

$$U_{C39H} = U_{VCC} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R + R_{96}}{2 \cdot R + R_{96}}} \quad (31)$$

jestliže je $R_{96} \ll R$ pak lze výpočet nejvyššího prahového napětí na kondenzátoru U_{C39H} dále zjednodušit na rovnici 32:

$$U_{C39H} = \frac{2}{3} \cdot U_{VCC} = \frac{2}{3} \cdot 7 = 4,66 \text{ V} \quad (32)$$

Přepínací perioda PWM signálu obrysového světla T_{OS} je dána součtem doby nabíjení kondenzátoru C_{39} (t_{ON}) a doby vybíjení (t_{OFF}), tak jako je uvedeno v rovnici 33:

$$T_{OS} = t_{ON} + t_{OFF} \quad (33)$$

PWM modul je navržený na hodnoty činitele plnění $D_{PWM} = 50 \div 99 \%$. Proto musí být do logického obvodu doplněn tranzistor v zapojení se společným emitorem, který zajistí požadovaný činitel plnění obrysového světla $D_{OS} = 10 \%$, jako invertovaný signál PWM modulu s činitelem plnění nastaveným na 90% . Logický obvod i invertující

tranzistor budou popsány v kapitole 3.10. Z požadované frekvence $f_{PWM} = 200 \text{ Hz}$ vyplývá, že čas zapnutí PWM generátoru $t_{ON OS}$ lze vypočítat podle rovnice 35:

$$T_{OS} = \frac{1}{f_{PWM}} = \frac{1}{200} = 5 \text{ ms} \quad (34)$$

$$t_{ON OS} = (1 - D_{OS}) \cdot T_{OS} = (1 - 0,1) \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 4,5 \text{ ms} \quad (35)$$

podle rovnice 36 pro výpočet $t_{ON OS}$ PWM modulu, je možné dále vyjádřit rovnici 37 pro výpočet hodnoty odporu rezistor R_{107} :

$$t_{ON OS} = -R_{107} \cdot C_{39} \cdot \ln \left(1 - \frac{U_{C39 H} - U_{C39 L}}{U_{VCC} - U_{C39 L}} \right) \quad (36)$$

$$R_{107} = -\frac{t_{ON OS}}{C_{39} \cdot \ln \left(1 - \frac{U_{C39 H} - U_{C39 L}}{U_{VCC} - U_{C39 L}} \right)} = -\frac{4,5 \cdot 10^{-3}}{68 \cdot 10^{-9} \cdot \ln \left(1 - \frac{4,66 - 2,33}{7 - 2,33} \right)} = 95472 \Omega \quad (37)$$

byla zvolena hodnota rezistoru $R_{107} = 91 \text{ k}\Omega$. Čas vypnutí PWM generátoru $t_{OFF OS}$ lze vypočítat podle následujícího vzorce:

$$t_{OFF} = -\left(\frac{1}{\frac{1}{R_{107}} + \frac{1}{(R_{111} \parallel R_{115})}} \right) \cdot C_{39} \cdot \ln \left(\frac{U_{C39 L}}{U_{C39 H}} \right) \quad (38)$$

hodnotu $t_{OFF OS}$ lze odvodit z rovnice 33 a po vyjádření paralelně spojených rezistorů R_{111} a R_{115} je možné dopočítat hodnoty jejich odporů (rovnice 34):

$$t_{OFF OS} = T_{OS} - t_{ON OS} = 5 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-3} = 0,5 \text{ ms} \quad (33)$$

$$R_{111} \parallel R_{115} = \frac{1}{-\frac{1}{t_{OFF OS}} \cdot C_{39} \cdot \ln \left(\frac{U_{C39 L}}{U_{C39 H}} \right) - \frac{1}{R_{107}}} = \frac{1}{-\frac{1}{0,5 \cdot 10^{-3}} \cdot 68 \cdot 10^{-9} \cdot \ln \left(\frac{4,66}{2,33} \right) - \frac{1}{91 \cdot 10^3}} = 12007,8 \Omega \quad (34)$$

Díky dvěma paralelně spojeným rezistorům je možné libovolně nastavit přesnější hodnotu činitele plnění. Pro tuto funkci byly vybrány hodnoty $R_{111} = 20 \text{ k}\Omega$ a $R_{115} = 33 \text{ k}\Omega$. Pro PWM modul směrového světla bude použito stejného zapojení. Pro dosažení požadovaného činitele plnění $D_S = 80 \%$ byl aplikován stejný výpočet a do výsledného zapojení byly dosazeny rezistory s hodnotami: $R_{87} = 82 \text{ k}\Omega$, $R_{97} = 33 \text{ k}\Omega$, $R_{100} = 33 \text{ k}\Omega$.

3.8 Obvod detekce

Obvody detekce, které jsou z důvodu legislativních požadavků nezbytnou součástí řídicí jednotky, mají za úkol kontrolovat provoz LED a v případě jejich poruchy změnit stav systému určeného k signalizaci poruchy a to až do chvíle deaktivace/restartu systému, která bývá spojena s aktivací zapalování automobilu. Vyhodnocovacím parametrem je velikost proudu, tekoucího přes detekční pin. Proud je nastavován obvodem umělé zátěže, jejíž princip je vysvětlen v následující kapitole. Projevem detekčního obvodu tedy bude signál aktivující umělou zátěž a zároveň vypnutí funkce pomocí výstupního MOS tranzistoru.

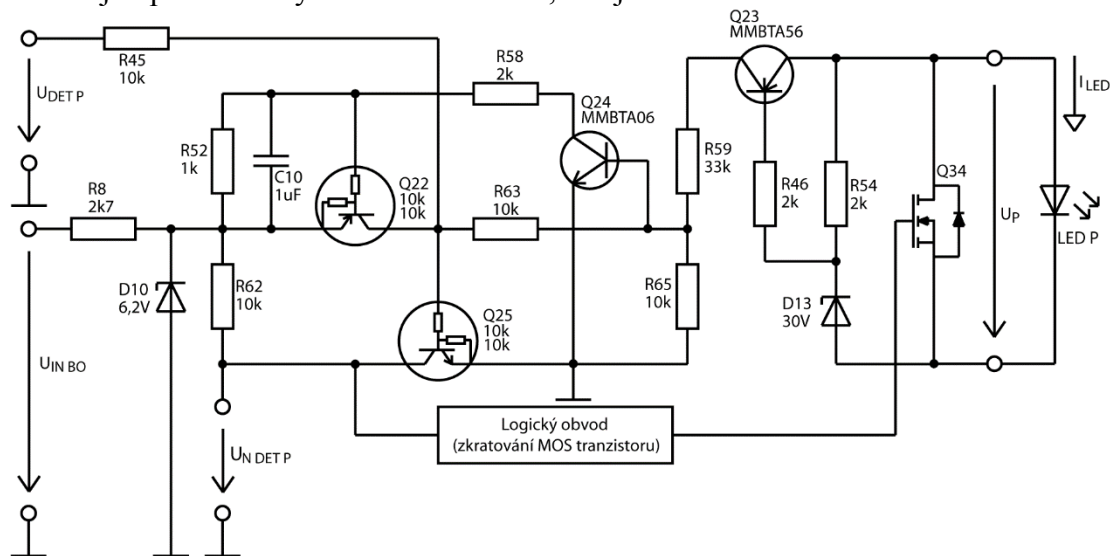
Obvody detekce, které jsou z důvodu legislativních požadavků nezbytnou součástí řídicí jednotky, mají za úkol kontrolovat provoz LED a v případě jejich poruchy změnit stav systému určeného k signalizaci poruchy a to až do chvíle restartu zapalování automobilu. Vyhodnocovacím parametrem je velikost proudu, tekoucího přes detekční pin. Proudů jsou nastavovány obvodem umělé zátěže, jejíž princip je vysvětlen v následující kapitole. Projevem detekčního obvodu tedy bude signál aktivující umělou zátěž a zároveň vypnutí funkce pomocí výstupního MOS tranzistoru.

Pro definici principiální funkce samotné detekce je nutné pochopit mechanismus, kterým může k poruše LED dojít. Existují dva základní typy elektrických poruch.

První chybový stav je rozpojení LED, druhý její zkrat. Rozpojení LED může nastat vlivem jejího mechanického poškození a následnému přerušení propojovacího drátu čipu ("bond") nebo přímo defektem na čipu vlivem tepla či proudu (označovaný jako "overstress"). Ke zkratu může dojít také následkem proudového průrazu s velkou intenzitou, především vlivem ESD. V takových případech může být ochranný transil implementovaný na čipu LED přetížen, což vede k jeho trvalé aktivaci. Poruchy způsobené vlivem ESD bývají méně časté, neboť veškerá výroba probíhá v prostorách EPA ("ESD protected area") s příslušnými pravidly pro zacházení s citlivou elektronikou. Pravděpodobnost výskytu poruchy ve formě zkratu je snížena na minimum, proto má význam realizovat detekci citlivou jen na rozpojení LED. V případě, že zákazník neuzná typ detekce jako dostatečný, je možné světlomet doplnit i detekcí zkratu LED, která se umísťuje přímo na LED modul. Každá LED je hlídána jedním bipolárním tranzistorem a v případě zkratu je unipolárním tranzistorem celý LED string rozpojen, takže se ve výsledku LED string jeví řídicí jednotce jako rozpojený.

Občas se vyskytují také kvazi-poruchy, které se projevují změnou napětí nebo změnou světelných parametrů. Takové poruchy jsou elektricky velmi obtížně detekovatelné, neboť detekce je založena pouze na měření parametrů elektrických. Tyto vady však s velkou pravděpodobností vedou k jedné ze dvou výše popsanych poruch.

Zapojení navržené detekce pro funkci potkávacího světla je na obrázku 25. Detekční obvod je aplikovatelný na každou funkci, ale je možné ho neosadit a tím deaktivovat.



Obrázek 25: Schéma zapojení detekce potkávacího světla

Detekční obvod je napájen přes rezistor R_8 a Zenerovu diodu D_{10} z trvalého napájení U_{INBO} , aby mohlo udržet detekci aktivní po celou dobu, od vzniku poruchy LED. Tedy například i po obnově její správné funkce

Během správné činnosti řídicí jednotky a bezchybné funkčnosti všech LED, kdy nemá docházet k detekci chyby, vytváří proud procházející LED stringem napětí, které je rovno součtu propustných napětí na všech použitých LED. Vzniklé napětí na třech sériových LED $U_P = 22,2\text{ V}$ se rozdělí na rezistor R_{54} a detekční Zenerovu diodu D_{13} . Zenerovo napětí diody je voleno tak, aby bylo v každém případě vyšší než nejvyšší možné napětí na LED zátěži, v tomto případě $U_{ZD13} = 30\text{ V}$. Klopný obvod tvořený tranzistory Q_{22} a Q_{24} je neaktivní a výstup klopného obvodu se nijak neprojevuje vůči ostatním obvodům.

Při chybě, konkrétně při rozpojení kterékoliv z LED, začne proud protékat přes Zenerovu diodu a tím dojde k narůstání jejího závěrného napětí až na hodnotu Zenerova napětí. Následně úbytek na rezistoru R_{54} způsobí otevření tranzistoru Q_{23} , čímž se otevře tranzistor Q_{24} a začne se nabíjet kondenzátor C_{10} . Kapacita kondenzátoru C_{10} je volena tak, aby detekční obvod nereagoval na rychlé impulsy, které by mohly být chybně vyhodnoceny jako porucha. Nabíjení kondenzátoru probíhá až do okamžiku otevření tranzistoru Q_{22} , který připojuje napětí Zenerovy diody D_{10} k výstupu detekčního obvodu s napětím U_{DETP} pro aktivaci obvodu umělé zátěže. Tranzistor Q_{25} vytváří negované napětí U_{NDETP} , pro deaktivaci funkce potkávacího světla pomocí zkratování LED unipolárním tranzistorem prostřednictvím logického obvodu.

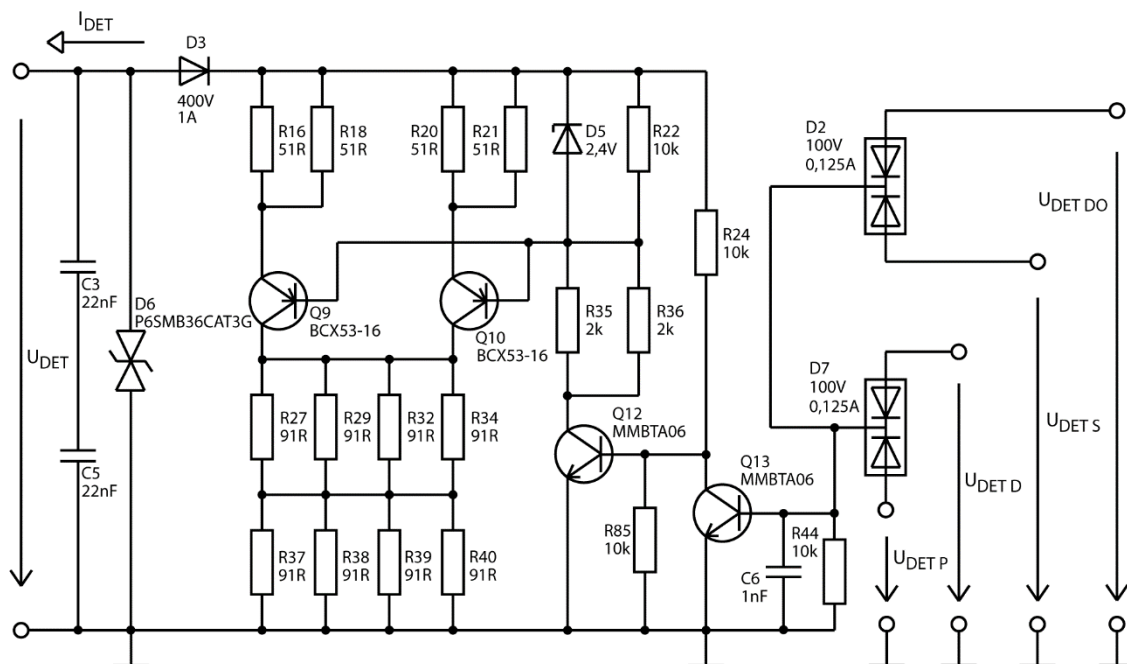
Oba tranzistory Q_{22} a Q_{24} společně tvoří klopný obvod typu "D". Po otevření Q_{22} se trvalé napájení ze Zenerovy diody D_{10} dostane i na bázi Q_{24} a tento stav zůstane neměnný až do restartu zapalování, který odpojí trvalé napájení U_{INBO} .

3.9 Umělá zátěž

Obvod umělé zátěže vyvolává změnu proudového odběru z detekčního pinu při poruše LED. Řídicí jednotka uvnitř automobilu proud vyhodnocuje a v případě jeho poklesu pod 10 mA indikuje poruchu na řídicí jednotce.

Detekční pin je napájen napětím U_{DET} v rozsahu 9 až 16 V a poruchový stav je signalizován proudem I_{DET} menším než 10 mA . Projevem bezchybného stavu je proudový odběr I_{DET} s minimální hodnotou proudu 130 mA . Informace o poruše LED přichází z detekčních obvodů v podobě signálů s logickou úrovní 1.

Na obrázku 26 je nakresleno schéma umělé zátěže. Principiálně funguje jako lineární proudový zdroj s PNP bipolárními tranzistory.



Obrázek 26: Schéma zapojení umělé zátěže

Vstup detekčního pinu je blokován dvěma kondenzátory C_3 a C_5 zapojenými v sérii. Dioda D_3 slouží jako ochrana proti přepólování a transil jako ochrana proti napěťovým špičkám.

K dvojitém diodám D_2 a D_7 jsou připojeny výstupy detekčních obvodů. Jejich spojení tvoří logiku OR. Stačí, aby se jeden z výstupů detekčních obvodů překlátil do úrovně logická 1 a tranzistor Q_{13} se otevře. Následkem toho dojde k vypnutí tranzistoru Q_{12} a tím i k odpojení reference umělé zátěže, tvořené Zenerovou diodou D_5 a rezistory R_{35} a R_{36} . Maximální proud $I_{DET ON MAX}$, odebíraný celým obvodem bude podle Ohmova zákona (rovnice 35) dán velikostí vstupního napětí a odporem rezistoru R_{24} a nesmí přesáhnout hodnotu 10 mA.

$$I_{DET ON MAX} = \frac{U_{DET MAX}}{R_{24}} = \frac{16}{10 \cdot 10^3} = 1,6 \text{ mA} \quad (35)$$

Není-li žádný z detekčních obvodu aktivovaný, pak je tranzistor Q_{13} zavřený a na referenční Zenerově diodě se nastaví napětí $U_{D5} = 2,4 \text{ V}$. Vlivem napětí přechodu báze-emitor u tranzistorů Q_9 a Q_{10} se na rezistorech R_{16} , R_{18} , R_{20} , R_{21} vytvoří úbytek napětí, který podle rovnice 36 vytváří na každém z rezistorů proud o velikosti I_{R16} :

$$I_{R16} = \frac{U_{D5} - U_{BE Q9}}{R_{16}} = \frac{2,4 - 0,65}{51} = 34,3 \text{ mA} \quad (36)$$

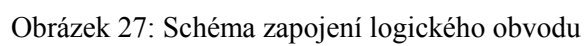
Celkový proud odebíraný obvodem bude součtem příspěvku všech rezistorů, tedy $I_{DET OFF} = 137,2 \text{ mA}$, což splňuje požadavek na minimální odběr 130 mA. S ohledem na maximální výkonové zatížitelnosti součástek bylo nutné násobit jejich počet tak, aby jejich limit nebyl překročen ani při $U_{DET MAX} = 16 \text{ V}$. Hodnoty výkonových zatížitelností v maximálních teplotách jsou pro tranzistor BCP53-16 $P_Q = 0,6 \text{ W}$ a rezistory v pouzdře 1206 $P_R = 0,25 \text{ W}$.

3.10 Logický (ovládací) obvod – tranzistorové řešení

Přepínání, tlumení a vypínání funkcí při detekci poruchy je řízeno logickým obvodem, který ovládá výstupní unipolární tranzistory BUK9875-100A, připojené paralelně k LED. Schéma logického obvodu je na obrázku 27. Pokud je tranzistor zkratován, teče proud cestou nejmenšího odporu, tedy právě přes zkratovaný tranzistor. Naopak, pokud je tranzistor vypnutý, všechny proud teče přes LED a napětí mezi elektrodami "drain" a "source" je rovno součtu propustných napětí všech připojených LED. Výstupní zkratovací tranzistory s kanálem vodivosti "N" vyžadují pro řízení elektrody "gate" napětí vyšší než je maximální napětí na elektrodě "source". Proto je na logický řídicí obvod přivedeno napětí U_{BO} generované měničem "BOOST", které tuto podmínku splňuje. Vysoká vstupní impedance tranzistorů zajišťuje, že i přes rezistory R_{68} , R_{69} , R_{70} a R_{71} s hodnotou odporu $56\text{ k}\Omega$ bude napětí U_{BO} dostatečně velké ke zkratování unipolárních tranzistorů a vypnutí funkce.

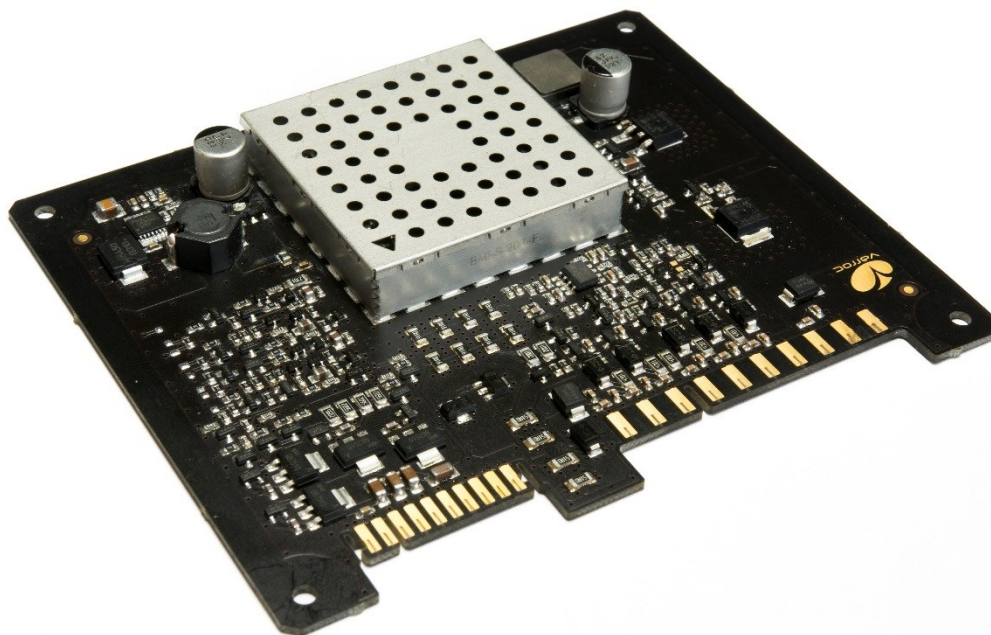
Zapnutí funkce neboli vypnutí unipolárního tranzistoru řídí logické hradlo NAND s bipolárními tranzistory MMBTA06. Výstupní logické úrovně 0, která zapíná funkci, je dosaženo pouze za předpokladu, že všechny vstupní napětí tranzistorů jsou v logické 1. Například logický obvod obrysového světla a denního osvětlení, který řídí unipolární tranzistor Q_{26} je tvořen třemi sériovými bipolárními tranzistory Q_{15} , Q_{18} , Q_{27} . Tranzistor Q_{27} je otevřený trvale negovaným napětím z neaktivního detekčního obvodu denního osvětlení $U_{N\text{ DET } DO}$. Q_{18} je také řízen trvale z PWM modulu obrysového světla s činitelem plnění $D_{OS} = 10\%$. Tranzistor Q_{19} neguje sekvenci PWM signálu, protože PWM moduly jsou použitelné v rozsahu $50 \div 99\%$. Pro zapnutí funkce obrysového světla stačí aktivovat tranzistor Q_{15} přivedením signálu $U_{IN\text{ OS}}$ s úrovní logická 1. Vstupní signál $U_{IN\text{ DO}}$ slouží k přepnutí obrysového světla na denní osvětlení tím, že se tranzistor Q_{18} sepne trvale a nereaguje na PWM signál přicházející z tranzistoru Q_{19} .

Rezistory R_{112} , R_{113} a R_{114} omezují proud ochrannými Zenerovými diodami D_{17} , D_{20} a D_{22} . Dioda D_{24} omezovací rezistor nevyžaduje, protože napětí na její anodě nikdy nepřekročí hodnotu Zenerova napětí. Logický obvod byl navržen tak, aby nedošlo k překročení maximálního závěrného napětí přechodu báze-emitor u bipolárních tranzistorů.



4 PRAKTICKÉ OVĚŘENÍ A TESTOVÁNÍ ŘÍDÍCÍ JEDNOTKY

Na základě návrhu řídicí jednotky podle všech požadavků a syntézy obvodů elektronických částí byla následně realizována její fyzická podoba. Fotografie kompletní řídicí jednotky je na obrázku 28.



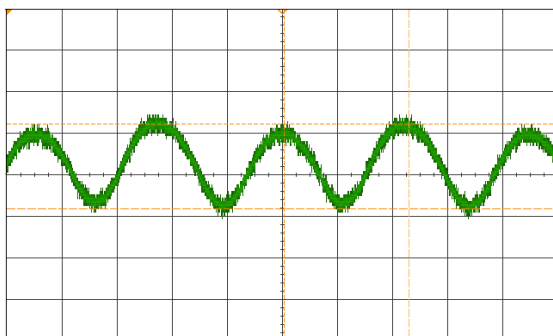
Obrázek 28: Fotografie řídicí jednotky

Testováním parametrů v posloupnosti uvedené v kapitole 2.2.2 a analýzou měřených dat byla ověřována shoda s požadovanými parametry. Kromě stanovených testů budou provedeny i další měření, jejichž cílem je potvrdit správnost navrženého řešení a správnost funkce všech částí obvodu. Jednotlivé testy byly vykonány za podmínek, které se nejvíce přibližují nejhorším možným okolnostem. Účelem je dosažení výsledků, které zaručí spolehlivý chod elektroniky za jakýchkoliv provozních podmínek. Například při testování zatížení řídicí jednotky budou zapnuty funkce s nejvyšším celkovým výkonem. Předpoklad je, že nelze provozovat současně funkci denního svícení a potkávacího světla, proto je nejhorší možný případ potkávací, dálkové, směrové a obrysové světlo. S ohledem na použití spínaných zdrojů, kterým se snižuje účinnost se snižujícím se vstupním napětím, bude většina testů provedena při $U_{IN MIN} = 9 V$.

4.1 Průběhy výstupních veličin

Pro každou funkci byl změřen průběh výstupního proudu pomocí proudové sondy,

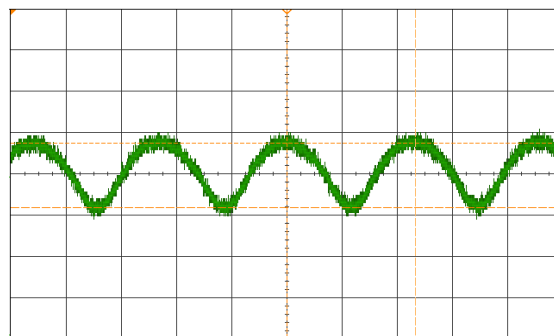
připojené k osciloskopu. Cílem měření je ukázat, že zvlnění proudu nepřesahuje hodnotu $\delta I_{LED} = 20 \%$, což odpovídá absolutní hodnotě $\Delta I_{LED} = 0,18 \text{ A}$ vypočítané v kapitole 3.4. Kromě měření všech funkcí samostatně bylo změřeno i zvlnění proudu při kombinaci všech funkcí. Všechna měření byla provedena při nejvyšším možném výkonu, tedy při napájecím napětí 9 V.



CH1: 20 mA/div, 2 μs /div

X1: 36,85 μs Y1: 934,75 mA
X2: 41,4 μs Y2: 894,25 mA
 ΔX : 4,55 μs ΔY : 40,5 mA
 $1/\Delta X$: 219,78 kHz

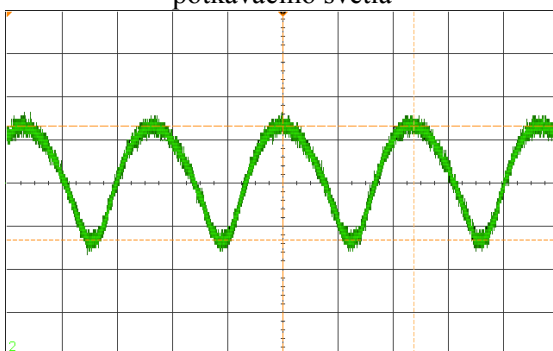
Obrázek 29: Výstupní zvlnění proudu
potkávacího světla



CH1: 20 mA/div, 2 μs /div

X1: 30,35 μs Y1: 927,5 mA
X2: 35 μs Y2: 896 mA
 ΔX : 4,65 μs ΔY : 31,5 mA
 $1/\Delta X$: 215,05 kHz

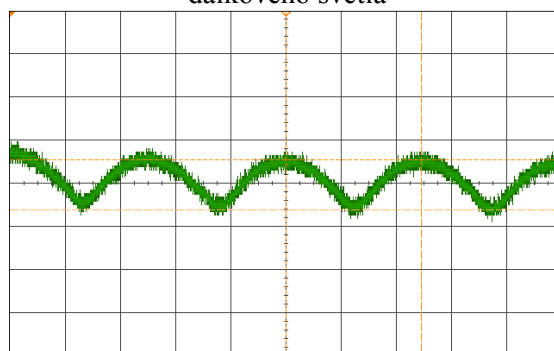
Obrázek 30: Výstupní zvlnění proudu
dálkového světla



CH1: 20 mA/div, 2 μs /div

X1: 2,8 ms Y1: 871 mA
X2: 2,79 ms Y2: 923,5 mA
 ΔX : 4,74 μs ΔY : 52,5 mA
 $1/\Delta X$: 210,97 kHz

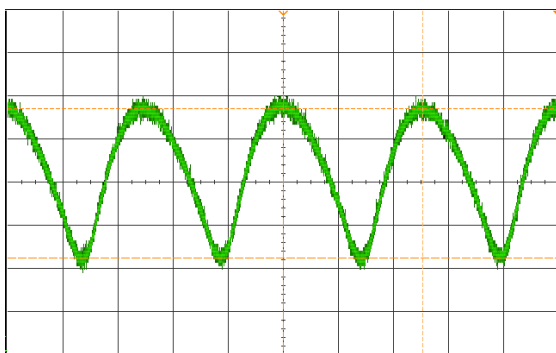
Obrázek 31: Výstupní zvlnění proudu
směrového světla



CH1: 20 mA/div, 2 μs /div

X1: 28,95 μs Y1: 928,75 mA
X2: 33,85 μs Y2: 905,75 mA
 ΔX : 4,9 μs ΔY : 23 mA
 $1/\Delta X$: 204,08 kHz

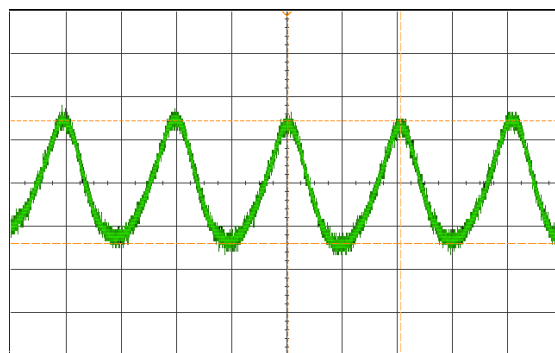
Obrázek 32: Výstupní zvlnění proudu denního
osvětlení



CH1: 20 mA/div, 2 μ s/div

X1: -55,24 μ s Y1: 973,5 mA
 X2: -60,3 μ s Y2: 904,5 mA
 ΔX : 5,06 μ s ΔY : 69 mA
 $1/\Delta X$: 197,63 kHz

Obrázek 33: Výstupní zvlnění proudu obrysového světla



CH1: 20 mA/div, 2 μ s/div

X1: -39 μ s Y1: 885,25 mA
 X2: -34,9 μ s Y2: 828,5 mA
 ΔX : 4,1 μ s ΔY : 56,75 mA
 $1/\Delta X$: 243,9 kHz

Obrázek 34: Výstupní zvlnění proudu při zapnutých všech funkcí

Na obrázcích výše jsou zaznamenány průběhy zvlnění proudu potkávacího dálkového, směrového, obrysového světla a denního osvětlení. Na obrázku 4.6 je průběh proudu ve chvíli, kdy jsou aktivovány všechny funkce současně. Tabulka 5 shrnuje hodnoty zvlnění. Absolutní hodnota zvlnění proudu potkávacího světla ΔI_P je vypočítána jako rozdíl maximální a minimální hodnoty proudu. Relativní hodnota je vypočítána podle rovnice 37 z absolutní hodnoty ΔI_P a nominální hodnoty proudu $I_{LED} = 900 \text{ mA}$.

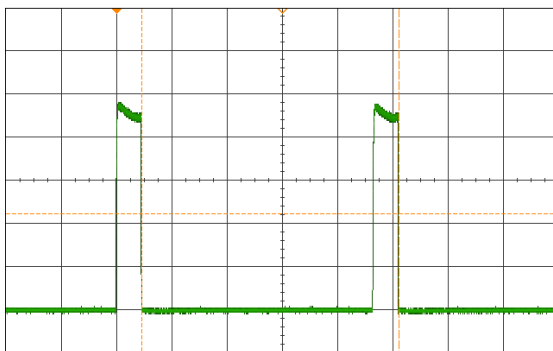
$$\delta I_P = \frac{\Delta I_P}{I_{LED}} \cdot 100 = \frac{40,5 \cdot 10^{-3}}{900 \cdot 10^{-3}} \cdot 100 = 4,5 \% \quad (37)$$

Tabulka 5: Velikost zvlnění jednotlivých funkcí

	$\Delta I_{LED} [A]$	$\delta I_{LED} [\%]$
Potkávací světlo	40,5	4,5
Dálkové světlo	31,5	3,5
Směrové světlo	52,5	5,8
Denní osvětlení	23	2,5
Obrysové světlo	69	7,6
Všechny funkce	56,8	6,3

Ze změřených a vypočítaných hodnot vyplývá, že zvlnění se ve všech případech pohybuje pod úrovní 20 %. Tím je potvrzeno, že řídicí jednotka vyhovuje kritériu pro řízení výkonu LED. Zároveň je splněn první bod ze stanovené sekvence testů.

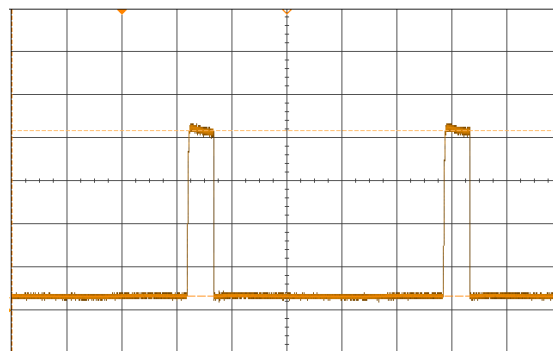
Následující obrázky demonstrují průběh napětí a proudu na LED obrysového a směrového světla, tlumených PWM moduly. Hodnoty napětí budou důležité pro další výpočty, například účinnosti. Z proudových průběhů jsou odečteny velikosti činitelů plnění. Měřená hodnota obrysového světla D_{OS} je 9,8 % a směrového světla D_S je 80,9 %.



CH1: 200 mA/div, 1 μs/div

Činitel plnění: 9,8 %

Frekvence: 214,50 Hz



CH1: 2 V/div, 1 ms/div

X1: -2 ms

Y1: 8,32 V

X2: 7,99 ms

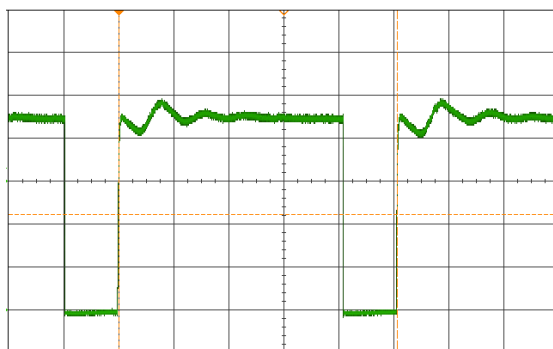
Y2: 650 mV

ΔX: 9,99 ms

ΔY: 7,67 V

Obrázek 35: Výstupní proud obrysového světla

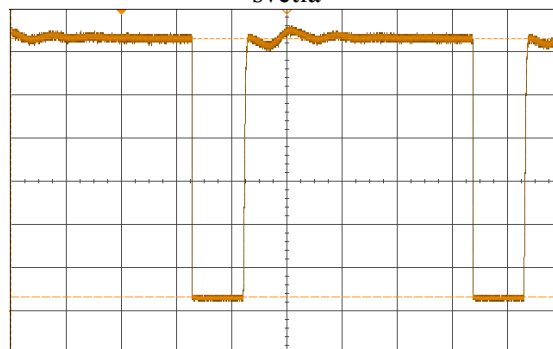
Obrázek 36: Výstupní napětí obrysového světla



CH1: 200 mA/div, 1 μs/div

Činitel plnění: 80,9 %

Frekvence: 197,43 Hz



CH1: 2 V/div, 1 μs/div

X1: -2 ms

Y1: 12,6 V

X2: 7,99 ms

Y2: 650 mV

ΔX: 9,99 ms

ΔY: 11,95 V

Obrázek 37: Výstupní proud směrového světla

Obrázek 38: Výstupní napětí směrového světla

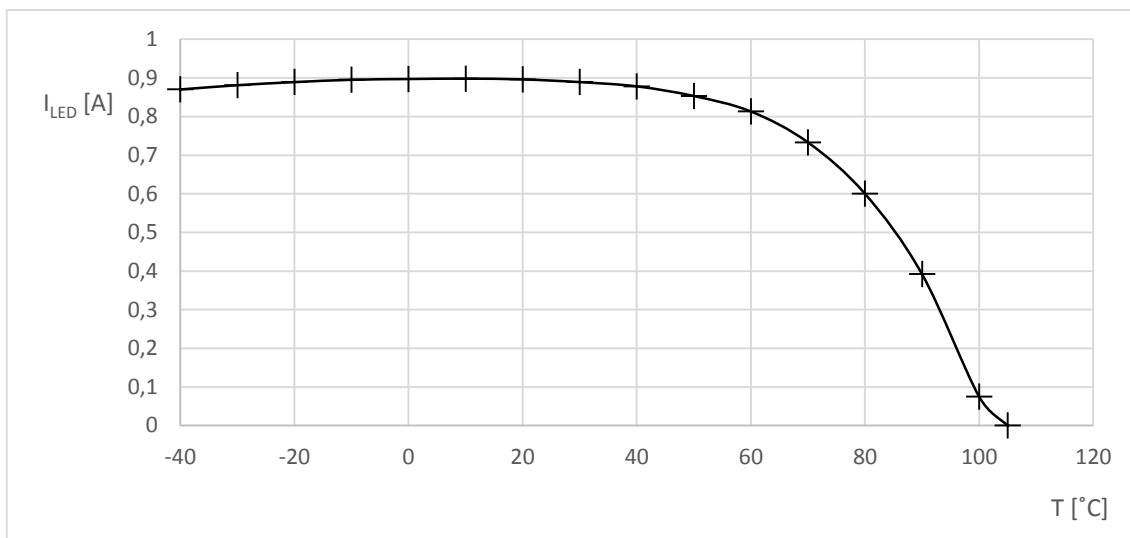
4.2 Teplotní testy

Zadáním pro teplotní testy je ověřit funkci ve všech teplotách a napětích. Podobný test, označovaný jako pětibodový se provádí při oficiální validaci. Testuje se pět krajních kombinací napětí a teplot včetně nominálního napětí a teploty. Zde je test v klimatické komoře proveden pro napětí $U_{IN MIN} = 9 V$, $U_{IN NOM} = 13,5 V$ i $U_{IN MAX} = 16 V$ v teplotách od $T_{A MIN} = -40 ^\circ C$ do $T_{A MAX} = +105 ^\circ C$. Pro každé nastavení bylo hlídáno, zda všechny funkce svítí a nedochází k neočekávanému chování. Současně byla odečtena hodnota vstupního i výstupního proudu. Hodnoty jsou zaznamenány v tabulce 6.

Tabulka 6: Vstupní a výstupní proudy, teplotního testu v klimatické komoře

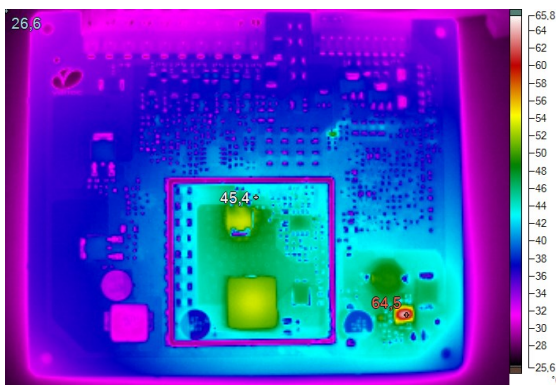
Teplota okolí [°C]	$U_{IN} [V]$					
	9		13,5		16	
	$I_{IN} [A]$	$I_{OUT} [A]$	$I_{IN} [A]$	$I_{OUT} [A]$	$I_{IN} [A]$	$I_{OUT} [A]$
-40	5,753	0,87	3,48	0,863	2,913	0,862
-30	5,831	0,881	3,51	0,876	2,933	0,876
-20	5,88	0,889	3,523	0,885	2,942	0,885
-10	5,935	0,895	3,53	0,891	2,944	0,891
0	5,988	0,897	3,52	0,896	2,942	0,896
10	5,972	0,898	3,511	0,897	2,935	0,897
20	5,96	0,896	3,508	0,897	2,925	0,897
30	5,931	0,889	3,474	0,893	2,897	0,893
40	5,829	0,878	3,429	0,886	2,86	0,886
50	5,568	0,853	3,339	0,868	2,793	0,87
60	5,165	0,813	3,19	0,837	2,666	0,837
70	4,5	0,733	2,869	0,766	2,416	0,768
80	3,445	0,6	2,29	0,624	1,925	0,628
90	2,13	0,392	1,35	0,377	1,143	0,38
100	0,516	0,075	0,34	0,069	0,296	0,068
110	0,129	0	0,107	0	0,103	0

Z naměřených dat lze sestavit křivku teplotní kompenzace, která vypovídá nejen o závislosti proudu na teplotě okolního prostředí řídicí jednotky, ale přibližně i o světelném výstupu z LED. Na obrázku 39 je graf pro $U_{IN\ MIN} = 9\ V$, ze kterého je zřejmé, že proud začne výrazněji klesat okolo teploty $70\ ^\circ C$. V rozsahu teplot T_A od $-40\ ^\circ C$ do $60\ ^\circ C$ je proud stálý, s hodnotou okolo $900\ mA$. Chování teplotní kompenzace nad $90\ ^\circ C$, kdy proud klesá pod $300\ mA$ až na $0\ A$ lze případně změnit připojením paralelního rezistoru k termistoru R_{124} . Přídavný rezistor s hodnotou například $56\ k\Omega$ zajistí, že se proud při vysokých teplotách ustálí na třetinové hodnotě z původních $900\ mA$. Tímto testem byl splněn druhý bod ze seznamu testů uvedených v kapitole 2.2.2.

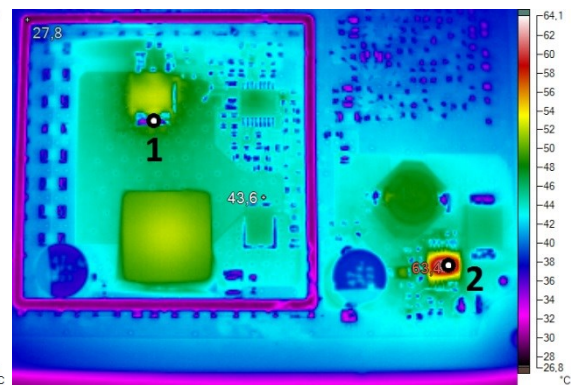


Obrázek 39: Křivka teplotní kompenzace pro vstupní napětí 9 V.

Dalším krokem pro ověření teplotního chování bylo zjištění maximální teploty součástek na desce plošných spojů pomocí termočlánků při největším zatížení. Za tímto účelem bylo s pomocí termo-kamery určeno, které komponenty jsou nejvíce teplotně zatěžovány. Ze snímku řídicí jednotky na obrázku 40 bylo určeno, že termočlánky budou připojeny na chladicí plochu tranzistoru Q_{38} a pouzdro integrovaného obvodu měniče "BUCK" IC_3 . Jedná se o spínací MOS tranzistor měniče "BOOST" (bod 1) a integrovaný obvod měniče "BUCK" (bod 2), který také obsahuje spínací MOS tranzistor. Místa přilepených termočlánků jsou znázorněna na obrázku 41.



Obrázek 40: Snímek řídicí jednotky z termo-kamery



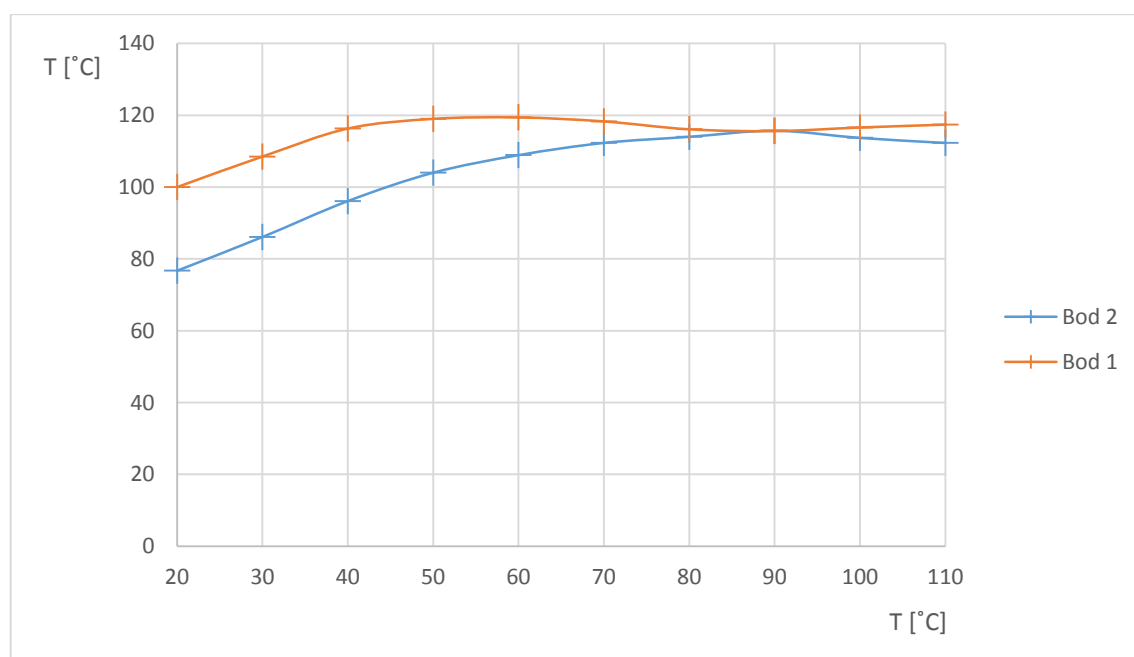
Obrázek 41: Místa umístění termočlánků

Řídicí jednotka byla umístěna i s termočlánky do klimatické komory. Test byl proveden v rozsahu teplot T_A od 20 °C do 105 °C tak, aby zahrnul oblast, kde se neuplatňuje teplotní kompenzace i oblast vysokých teplot okolí řídicí jednotky. Změřené hodnoty jsou v tabulce 7, ze kterých je vytvořen graf na obrázku 42. Nejvyšší teplota MOS tranzistoru $T_{Q38} = 119,4$ °C byla při okolní teplotě $T_A = 60$ °C a nejvyšší teplota integrovaného obvodu $T_{IC3} = 115,7$ °C byla při okolní teplotě $T_A = 90$ °C. Tyto teploty jsou s ohledem na teplotu skelného přechodu desky z materiálu FR4 $T_g = 135$ °C i maximální teplotu součástek bezpečné. Tímto testem byl ověřen třetí bod z

nastaveného testovacího plánu.

Tabulka 7: Teplota nejvíce zatěžovaných součástek, v závislosti na teplotě okolí

T_A [$^{\circ}\text{C}$]	$U_{IN\ MIN} = 9\ \text{V}$	
	T_{IC3} [$^{\circ}\text{C}$]	T_{Q38} [$^{\circ}\text{C}$]
110	112,3	117,4
100	113,7	116,6
90	115,7	115,6
80	114	116,1
70	112,3	118,3
60	108,9	119,4
50	104	119
40	96,1	116,3
30	86,1	108,5
20	76,7	100

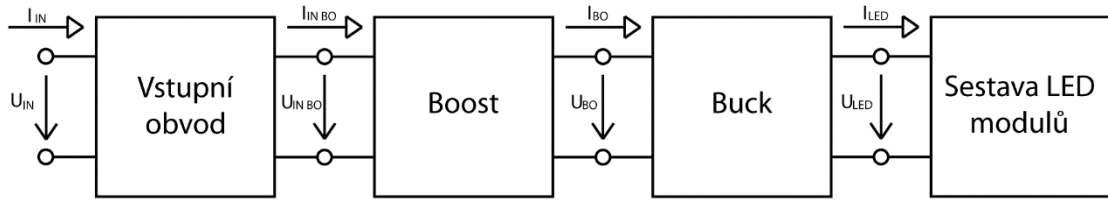


Obrázek 42: Měřené maximální teploty nejzatěžovanějších součástek

4.3 Měření účinnosti

Parametrem jakosti spínaného zdroje je jeho účinnost η . Bylo provedeno měření napětí a proudů na LED modulech i proudů na zdroji při různých napětích za účelem zjištění celkové účinnosti řídicí jednotky. Při jejím návrhu byly předpokládány účinnosti spínaných zdrojů $\eta_{BU} = 95\ %$ a $\eta_{BO} = 80\ %$, které budou také předmětem analýzy v této kapitole. Aby bylo možné zjistit také účinnosti samotných spínaných zdrojů, byly v řídicí jednotce měřeny i interní proudy a napětí. Blokové schéma, podle kterého bylo měření

provedeno, je na obrázku 43.



Obrázek 43: Blokové schéma pro měření účinnosti

V tabulce 8 jsou shrnuty měřené hodnoty napětí a proudů I_{LED} a U_{LED} i vstupního proudu I_{IN} při vstupních napětích U_{IN} v rozsahu od 9 do 16 V. Z nich jsou vypočítány výkony P_{IN} a P_{LED} .

Tabulka 8: Výkonové zatížení vstupního a zatěžovacího obvodu v závislosti na vstupním napětí U_{IN}

U_{IN} [V]	I_{IN} [A]	P_{IN} [W]	U_{LED} [V]	I_{LED} [A]	P_{LED} [W]
9	5,79	52,11	44,25	0,9	39,83
10	5,03	50,30	44,23	0,9	39,81
11	4,49	49,39	44,22	0,9	39,80
12	4,05	48,60	44,20	0,9	39,78
13	3,70	48,10	44,18	0,9	39,76
14	3,41	47,74	44,15	0,9	39,74
15	3,17	47,55	44,13	0,9	39,72
16	2,96	47,36	44,12	0,9	39,71

Ve druhé tabulce (tabulka 9) jsou měřené hodnoty napětí a proudů uvnitř řídicí jednotky, a z nich vypočítané výkony.

Tabulka 9: Výkonové zatížení na vstupech DC/DC měničů v závislosti na vstupním napětí U_{IN}

U_{IN} [V]	$U_{IN BO}$ [V]	$I_{IN BO}$ [A]	$P_{IN BO}$ [W]	U_{BO} [V]	I_{BO} [A]	P_{BO} [W]
9	8,55	5,78	49,42	59,56	0,696	41,45
10	9,60	4,98	47,81	59,54	0,696	41,44
11	10,60	4,45	47,17	59,54	0,696	41,44
12	11,60	4,00	46,40	59,53	0,696	41,43
13	12,63	3,65	46,10	59,52	0,696	41,43
14	13,60	3,36	45,70	59,51	0,696	41,42
15	14,70	3,12	45,86	59,51	0,696	41,42
16	15,70	2,91	45,69	59,50	0,696	41,41

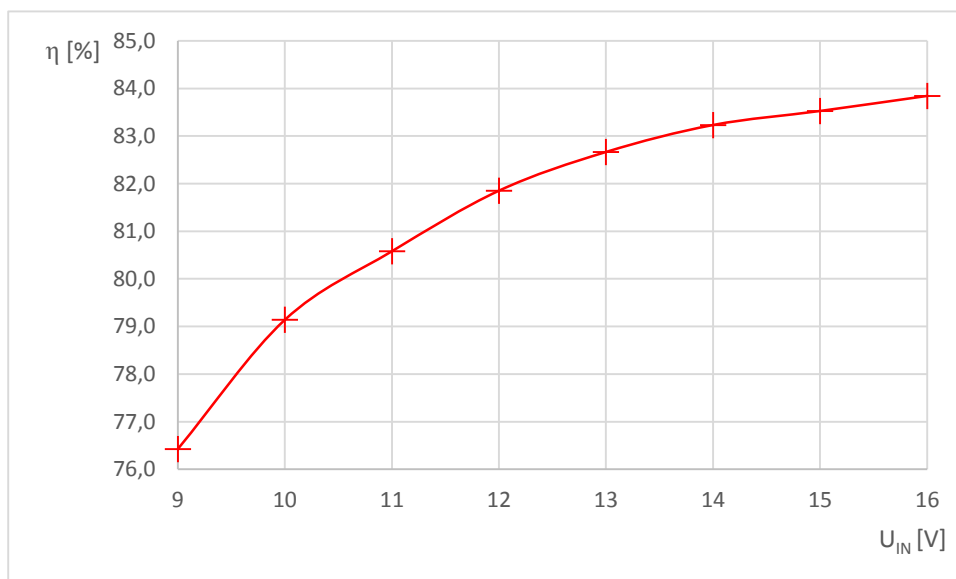
Třetí tabulka pak shrnuje vypočítané účinnosti v závislosti na vstupním napětí U_{IN} . Vzorový výpočet účinnosti pro $U_{IN} = 9$ V je v rovnici 38:

$$\eta_9 = \frac{P_{LED 9}}{P_{IN 9}} \cdot 100 = \frac{39,83}{52,11} \cdot 100 = 76,4 \% \quad (38)$$

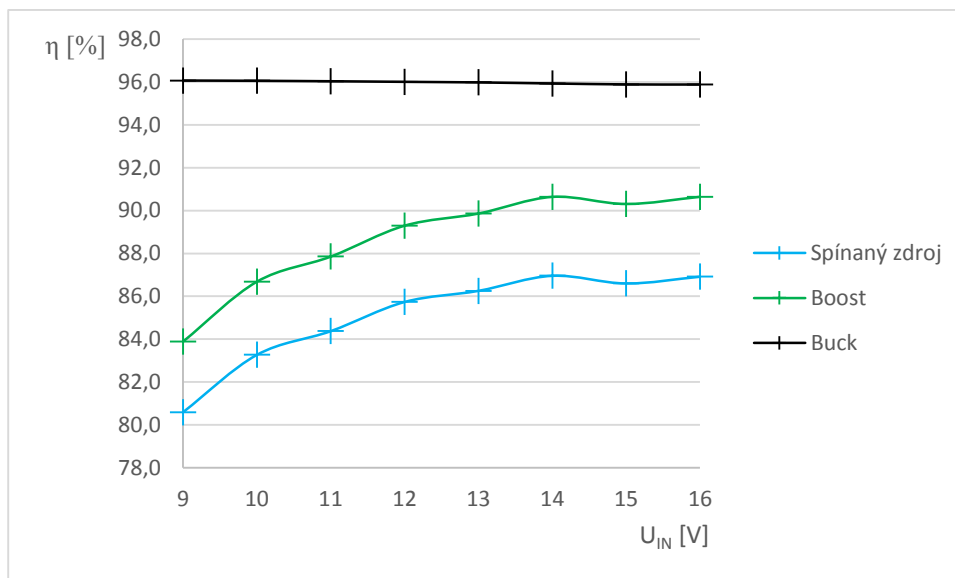
Tabulka 10: Výsledné účinnosti v závislosti na vstupním napětí U_{IN}

U_{IN} [V]	η [%]	η_{BO+BU} [%]	η_{BO} [%]	η_{BU} [%]
9	76,4	80,6	83,9	96,1
10	79,1	83,3	86,7	96,1
11	80,6	84,4	87,9	96,0
12	81,9	85,7	89,3	96,0
13	82,7	86,3	89,9	96,0
14	83,2	87,0	90,6	95,9
15	83,5	86,6	90,3	95,9
16	83,8	86,9	90,6	95,9

Z vypočítaných hodnot účinností byly sestaveny dva grafy. První, na obrázku 44, ukazuje průběh celkové účinnosti řídicí jednotky v závislosti na vstupním napětí. Druhý graf, obrázku 45, ukazuje také průběh účinnosti, ale zaměřuje se na samostatný spínaný zdroj. Černou barvou je vyznačen průběh měniče "BUCK", který drží konstantní hodnotu účinnosti okolo 96%. Zelenou barvou je vyznačen průběh účinnosti samotného měniče "BOOST" s účinností 84 % při $U_{IN\ MIN} = 9\ V$. Modrou barvou je vyznačen průběh celého spínaného zdroje řídicí jednotky, zahrnující oba DC/DC měniče. Z tabulek i grafů je zřejmé, že předpokládané hodnoty, použité při návrhu $\eta_{BU} = 95\ %$ a $\eta_{BO} = 80\ %$ se výrazně neliší. Nejnižší účinnost řídicí jednotky byla 76,4 %, podle očekávání při $U_{IN\ MIN} = 9\ V$ a tím byl splněn čtvrtý bod z naplánovaných testů.



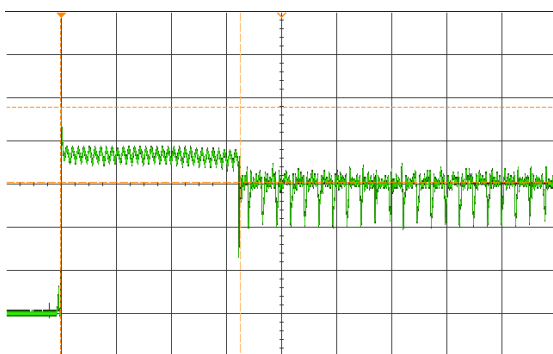
Obrázek 44: Průběh celkové účinnosti řídicí jednotky v závislosti na vstupním napětí



Obrázek 45: Průběhy jednotlivých účinností spínaného zdroje.

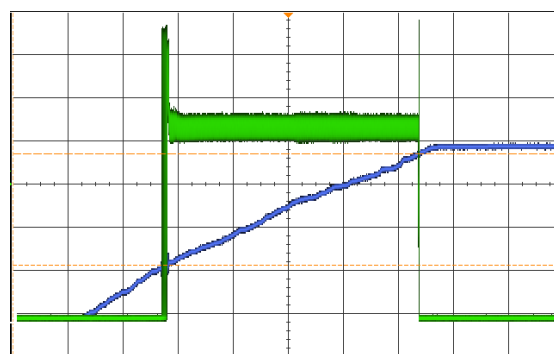
4.4 Vstupní obvod

Vstupní obvod zajišťuje ochranu proti přepólování vstupního napětí, ochranu proti přepětí a zároveň snižuje nárazové, špičkové proudy při připojení řídicí jednotky k napájení v důsledku přechodových jevů na kapacitách. Na obrázku 46 je průběh nárazového proudu při zapnutí řídicí jednotky a současně aktivaci všech funkcí. Špičková hodnota je 9,55 A. Prezentovaná hodnota byla ze všech měření i při separátně spouštěných funkcích nejvyšší, ale splňuje limit řídicí jednotky automobilu 24 A, vyžadovaný zákazníkem. Všechny měřené nárazové proudy s rezervou splňují obvykle požadované limity a bod číslo 5 ze stanoveného seznamu testů lze považovat za splněný.



CH1: 2 A/div, 20 ms/div

X1: -200 μ s Y1: 9,55 A
X2: 65 ms Y2: 6,075 A
 Δ X: 65,2 ms Δ Y: 3,475 A



CH1: 5 V/div, 1 s/div (modrá)

CH2: 200 mA/div, 1 s/div (zelená)

X1: -5 s Y1: 5,5625 V
X2: 5 s Y2: 18,5 V
 Δ X: 10 s Δ Y: 12,9375 V

Obrázek 46: Vstupní proudová špička

Obrázek 47: Přepětíová ochrana

Druhý měřený graf (obrázek 47) ukazuje průběhy rostoucího vstupního napětí modrou barvou a současně měřený proud I_{LED} znázorněný zelenou barvou. Z měření je

zřejmě, že řídicí jednotka začíná fungovat od 5,6 V a ochrana proti přepětí odpojuje řídicí jednotku při vstupním napětí nad 18,5 V.

4.5 DC/DC měnič BOOST

Oba DC/DC měniče byly podrobeny detailnější analýze, aby bylo možno porovnat realizovanou řídicí jednotku s parametry vypočítanými při jejich návrhu.

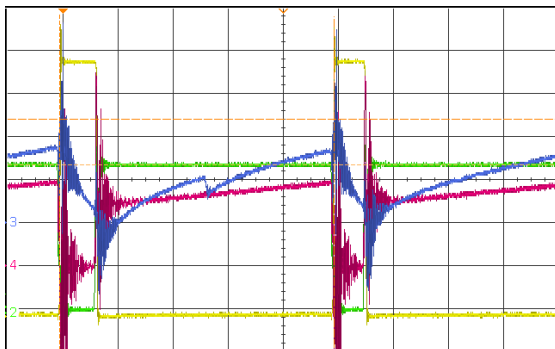
Na prvním snímku z osciloskopu (obrázek 48) jsou měřené průběhy při plném výkonu řídicí jednotky: napětí signálu na výstupním pinu integrovaného obvodu IC_4 $NDRV$ (zelenou barvou), pinu CS (modrou barvou), dále na rezistorech $R_{146} \div R_{152}$ snímajících proud spínací cívku L_3 (červená) a napětí spínacího tranzistoru Q_{38} na elektrodě "drain" (žlutá). Napětí na pinu $NDRV$, které je také na elektrodě "gate" spínacího N-MOS tranzistoru Q_{38} vypovídá o tom, kdy je tranzistor otevřený. Z průběhu lze odečíst spínací frekvenci 401,61 kHz, která je přibližně odpovídající vypočítané hodnotě $f_{BO} = 433,06 \text{ kHz}$, ale z důvodu rozmítání nelze frekvenci měřit přesně. Maximální činitel plnění, který je přibližně 86,3 % odpovídá velmi přesně maximálnímu vypočítanému činiteli plnění $D_{MAX BO} = 86 \%$. Inverzní průběh se žlutou barvou ukazuje napětí na elektrodě "drain", který je maximální po dobu zavření tranzistoru Q_{38} a nulový při jeho otevření. Červený průběh, znázorňující průběh napětí na rezistorech $R_{146} \div R_{152}$ odpovídá přesně nabíjecímu proudu, tekoucímu cívku ve chvíli, kdy je spínací tranzistor otevřen. Ze známé hodnoty rezistoru $R_{CS} = 29,5 \text{ m}\Omega$ a hodnoty špičkového napětí $U_{RCS} = 200 \text{ mV}$ podle grafu, lze vypočítat měřenou hodnotu špičkového nabíjecího proudu 6,78 A. Hodnota přibližně odpovídá vypočítanému špičkovému proudu $I_{LP BO} = 7,64 \text{ A}$. Průběh napětí na pinu CS je důležitý pro řízení maximálního činitele plnění měniče. V momentě dosažení prahového napětí $U_{CS} = 0,418$ se resetuje klopný obvod aktivující pin $NDRV$ a spínací cívka se začne vybíjet. Při porovnání průběhu napětí na pinu CS a nabíjecího proudu cívku je vidět mírná odlišnost, která je dána zaváděním výše popsané kompenzace sklonu.

Na druhém snímku z osciloskopu (obrázek 49) je zaznamenán stejně jako v předchozím případě nabíjecí proud cívku, v podobě napětí na snímacích rezistorech a proud Schottkyho diodou D_{30} odpovídající vybíjecímu proudu cívky. Hodnota proudu byla měřena proudovou sondou, proto lze z průběhu odečíst přímo hodnotu špičkového proudu 6,4 A při přepnutí cívky z nabíjecího do vybíjecího režimu.

Třetí snímek z osciloskopu demonstruje chování obvodu vypnutí při podpětí. Průběh s modrou barvou je měřené vstupní napětí U_{IN} , které narůstá od hodnoty 0 V. Průběh se zelenou barvou je měřené napětí na pinu $PWMDIM$ a červenou barvou výstupní proud I_{LED} . V momentě, kdy vstupní napětí U_{IN} překročí hodnotu 6,8 V, dosáhe napětí na pinu $PWMDIM$ prahové hodnoty $U_{PWMDIM} = 1,23 \text{ V}$ a výstupní proud s hodnotou přibližně 900 mA začne protékat přes LED. Měřením byla prokázána funkce obvodu při napájecím napětí 7 V, které je definované jako minimální provozní napětí při startovacím pulsu. Tím byl splněn bod číslo 6 ze seznamu prováděných testů.

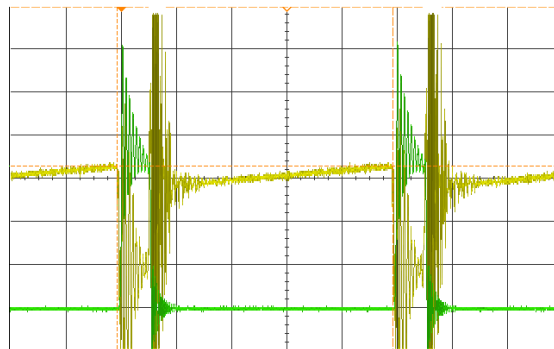
Poslední, čtvrtý snímek zachycuje detail napětí na elektrodě "gate" spínacího tranzistoru Q_{38} , modrou barvou. Po aktivaci tranzistoru, neboli jeho otevření, klesne napětí na elektrodě "drain" (žlutá barva) k nule. Zelenou barvou je zobrazeno napětí

měřené na výstupu měniče za Schottkyho diodou. Jeho hodnota je 59,8 V a je téměř shodné s nastavovanou hodnotou 60,87. Délka náběžné hrany napětí na "gate" a překmity jsou rozhodující pro tepelné ztráty tranzistoru způsobené spínáním a tím i pro účinnost spínaného zdroje. Byl proveden experiment, jehož cílem bylo zjistit kapacitu kondenzátoru C_{51} tak aby docházelo k co nejmenším ztrátám vlivem spínání.



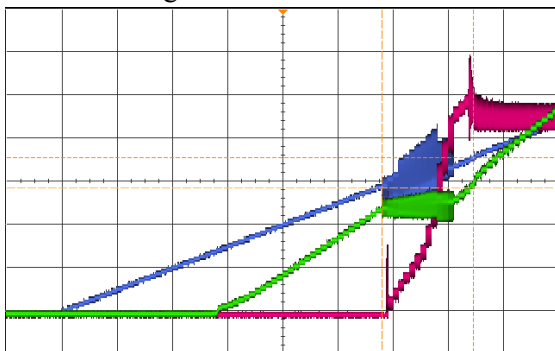
CH1: 10 V/div, 500 ns/div (žlutá)
 CH2: 2 V/div, 500 ns/div (zelená)
 CH3: 200 mV/div, 500 ns/div (modrá)
 CH4: 100 mV/div, 500 ns/div (červená)
 X1: -30 ns Y1: 267,5 mV
 X2: 2,46 μ s Y2: 480 mV
 Δ X: 2,49 μ s Δ Y: 212,50 mV
 $1/\Delta$ X: 401,61 kHz

Obrázek 48: Vybrané napěťové průběhy na integrovaném obvodu IC4



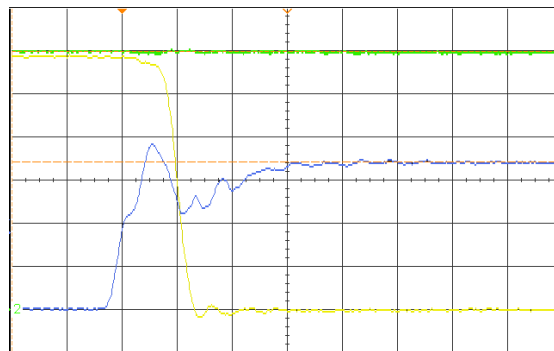
CH1: 100 mV/div, 500 ns/div (žlutá)
 CH2: 2 A/div, 500 ns/div (zelená)
 X1: -40 ns Y1: 6,4 A
 X2: 2,46 μ s
 Δ X: 2,5 μ s
 $1/\Delta$ X: 400 kHz

Obrázek 49: Průběh proudu přes spínací cívku a diodu měniče "BOOST"



CH1: 500 mV/div, 1 s/div (zelená)
 CH2: 2 V/div, 1 s/div (modrá)
 CH3: 200 mA/div, 1 s/div (červená)
 X1: 3,46 s Y1: 707,5 mA
 X2: 1,8 s Y2: 570 mA
 Δ X: -1,66 s Δ Y: 137,5 mA

Obrázek 50: Chování měniče "BOOST" při postupném zvyšování vstupního napětí



CH1: 10 V/div, 20 ns/div (žlutá)
 CH2: 10 V/div, 20 ns/div (zelená)
 CH2: 2 V/div, 20 ns/div (modrá)
 X1: -40 ns Y1: 11,97 V
 X2: 160 ns Y2: 6,82 V
 Δ X: 200 ns Δ Y: 5,15 mV

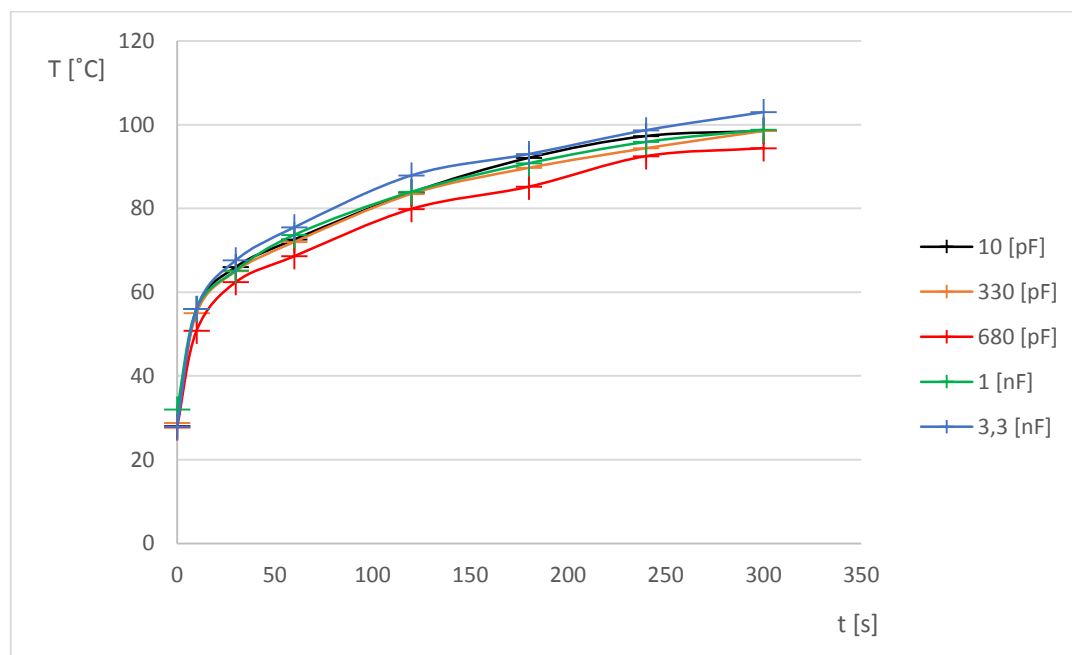
Obrázek 51: Průběh zapínání tranzistoru

Při experimentu byla měřena teplota MOS tranzistoru při maximálním zatížení výstupu DC/DC měniče a změny kapacity C_{51} . Teploty byly odečítány v přesných časových intervalech od zapnutí a výsledky byly shrnuty v tabulce 11, ze kterých byl

sestrojen graf na obrázku 52. Z výsledků vyplývá, že nejnižší teplo na tranzistoru vzniká při kapacitě $C_{51} = 680 \text{ nF}$.

Tabulka 11: Teplota tranzistoru Q_{38} v závislosti na kapacitě C_{51}

$t \text{ [s]}$	$T \text{ [}^{\circ}\text{C]}$				
	10 [pF]	330 [pF]	680 [pF]	1 [nF]	3,3 [nF]
0	28	28,8	27,7	32	27,9
10	56	55	50,8	56	56
30	66	65	62,4	65,2	67,6
60	72,6	72	68,6	73,7	75,5
120	83,8	83,5	79,9	84	87,9
180	92,1	89,7	85,2	90,8	93
240	97,3	94,4	92,5	95,9	98,7
300	98,5	98,5	94,4	98,8	103



Obrázek 52: Teplota tranzistoru Q_{38} v závislosti na kapacitě C_{51}

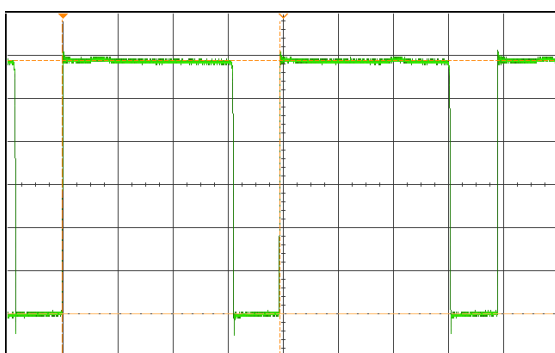
4.6 DC/DC měnič BUCK

Druhou částí spínaného zdroje je napěťový DC/DC měnič s proudovým výstupem "BUCK".

Na obrázku 54 je zachycen průběh napětí na pinech "SW", připojených k výstupní elektrodě "source" N-MOS spínacího tranzistoru uvnitř integrovaného obvodu LM3406. Z měřené doby periody $3,96 \mu\text{s}$ a doby sepnutí tranzistoru je možné vypočítat maximální měřený činitel plnění 80 %. Z toho plyne, že hodnota maximálního limitu $D_{MAX BU} = 95 \%$ poskytuje dostatečnou rezervu. Měřená frekvence $252,53 \text{ kHz}$ přibližně

koresponduje s nastavenou hodnotou $f_{BU} = 217,4 \text{ kHz}$.

Druhý snímek z osciloskopu (obrázek 53) zachycuje napětí na nastavovacím pinu "CS" žlutou barvou a napětí mezi rezistory R_{124} a R_{127} modrou barvou. Úbytek napětí na termistoru je minimální, což odpovídá minimálnímu vlivu obvodu teplotní kompenzace. Zároveň je ze snímku dobře patrné, že hodnota 200 mV prochází přesně střední úrovní napětí na pinu "CS". Tento princip se označuje jako řízení proudu jeho střední hodnotou. Od řízení proudu špičkovou hodnotou se liší přesností nastavení střední hodnoty proudu při změně absolutní hodnoty zvlnění. Ze střední hodnoty napětí modrého průběhu $178,75 \text{ mV}$ a známé hodnoty odporu $R_{127} = 200 \text{ m}\Omega$ lze podle ohmova zákona přesně vypočítat střední hodnotu skutečného, měřeného proudu tekoucího přes LED, která je $I_{LED \text{ M } 1k} = 893,75 \text{ mA}$. Nastavená hodnota při návrhu měniče byla $I_{LED} = 900 \text{ mA}$ pro hodnotu externího nastavovacího rezistoru $R_{LED} = 1 \text{ k}\Omega$.



CH1: 10 V/div, 1 $\mu\text{s}/\text{div}$

X1: 3,94 μs

Y1: 58,75 V

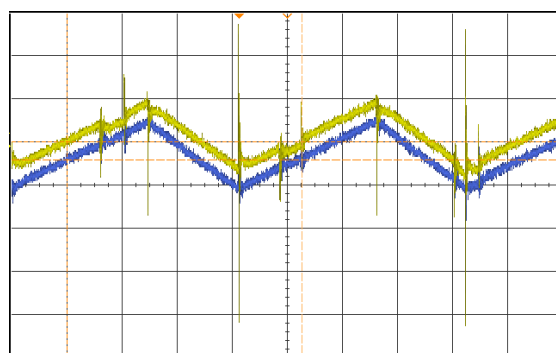
X2: -20 ns

Y2: 0 V

ΔX : 3,96 μs

ΔY : 58,75 V

$1/\Delta X$: 252,53 kHz



CH1: 50 mV/div, 1 $\mu\text{s}/\text{div}$ (žlutá)

CH2: 50 mV/div, 1 $\mu\text{s}/\text{div}$ (zelená)

X1: -3,12 μs

Y1: 200 mV

X2: 1,14 μs

Y2: 178,75 mV

ΔX : 4,26 μs

ΔY : 21,25 mV

Obrázek 53: Průběh napětí na pinu "SW"

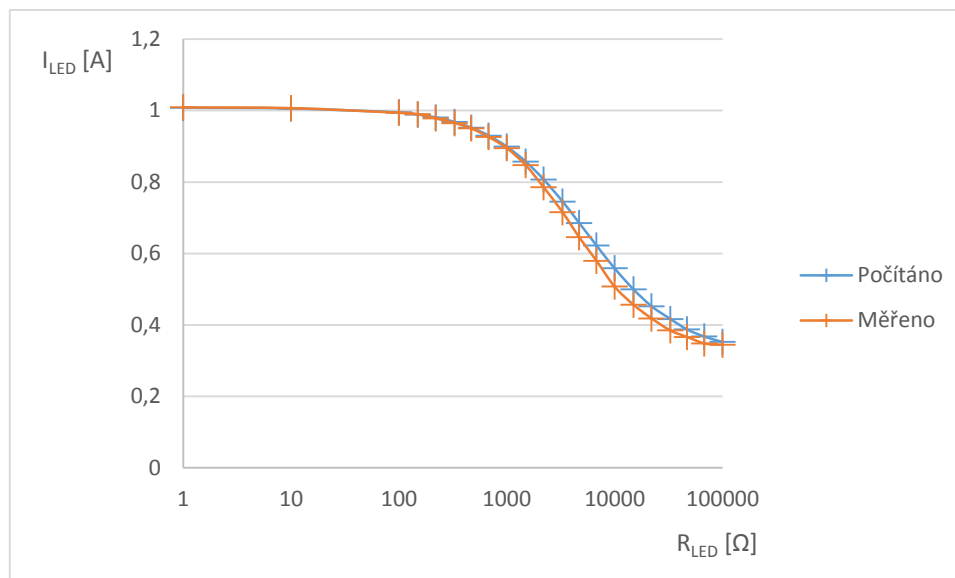
Obrázek 54: Průběh napětí na pinu "CS"

V tabulce 12 jsou měřené hodnoty výstupních proudů I_{LED} pro rozsah R_{LED} od 1Ω do $100 \text{ k}\Omega$. Tyto hodnoty lze porovnat s vypočítanými proudy z kapitoly 3.4 na obrázku 55.

Tabulka 12: Měřená závislost výstupního proudu na externím nastavovacím rezistoru

$R_{LED} [\Omega]$	1	10	100	150	220	330	470	680	1000	1500	2200
$I_{LED \text{ M }} [A]$	1,009	1,007	0,994	0,99	0,978	0,965	0,95	0,926	0,895	0,847	0,785

$R_{LED} [\Omega]$	3300	4700	6800	10000	15000	22000	33000	47000	68000	100000
$I_{LED \text{ M }} [A]$	0,715	0,645	0,579	0,507	0,456	0,418	0,384	0,366	0,348	0,344



Obrázek 55: Porovnávací charakteristika vypočítaných a měřených hodnot výstupního proudu v závislosti na externím nastavovacím rezistoru

Z tabulek 4 a 12 byla vypočítána největší absolutní chyba $\Delta I_{LED\ 10k}$ mezi měřenou a vypočítanou hodnotou proudu (rovnice 39), která nastala při hodnotě externího nastavovacího rezistoru $R_{LED} = 10\ k\Omega$. Z ní byla stanovena největší relativní chyba $\delta I_{LED\ 10k}$ jako největší procentuální odchylka (rovnice 40):

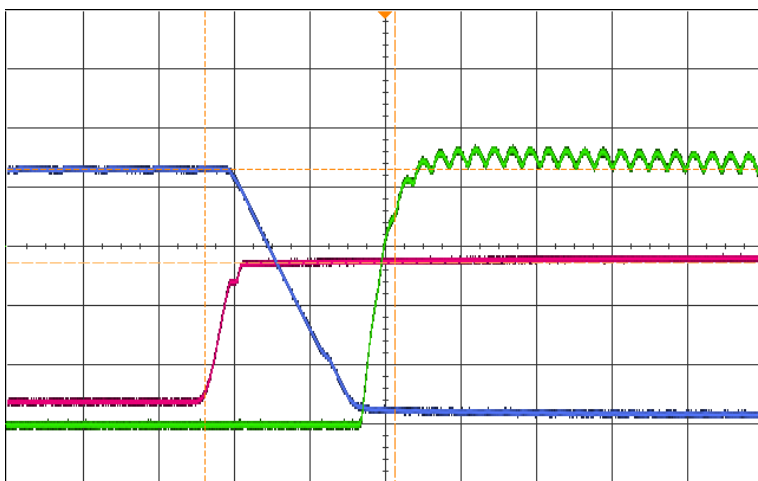
$$\Delta I_{LED\ 10k} = |I_{LED\ M\ 10k} - I_{LED\ 10k}| = |0,507 - 0,558| = 51\ mA \quad (39)$$

$$\delta I_{LED\ 10k} = \frac{\Delta I_{LED\ 10k}}{I_{LED\ 10k}} \cdot 100 = \frac{51 \cdot 10^{-3}}{0,558} \cdot 100 = 9,1\ \% \quad (40)$$

Stejný výpočet byl aplikován i pro hodnotu použitého externího nastavovacího rezistoru $R_{LED} = 1\ k\Omega$. Hodnoty absolutní a relativní chyby jsou $\Delta I_{LED\ 1k} = 4\ mA$ a $\delta I_{LED\ 1k} = 0,44\ \%$.

4.7 Výstupní obvod

Snímek z osciloskopu na obrázku 56 popisuje chování výstupního N-MOS tranzistoru Q_{26} pro funkci denního osvětlení, ve chvíli kdy jsou všechny ostatní funkce deaktivovány, tedy se zkratovanými tranzistory Q_{29} , Q_{31} a Q_{34} . Modře označené napětí na elektrodě "gate" je na začátku okolo $8,2\ V$, což odpovídá Zenerovu napětí diody D_{17} . Ve chvíli aktivace vstupu denního osvětlení uvnitř logického obvodu, prostřednictvím napětí $U_{IN\ DO}$ s červenou barvou, začne napětí na elektrodě "gate" tranzistoru Q_{26} klesat, až dojde k sepnutí výstupu a proud, označený zelenou barvou, začne protékat přes LED denního osvětlení.



CH1: 200 mA/div, 20 μ s/div (zelená)

CH2: 2 V/div, 20 μ s/div (červená)

CH3: 2 V/div, 20 μ s/div (modrá)

X1: -47,6 μ s

Y1: 8,6 V

X2: 2,6 μ s

Y2: 5,425 V

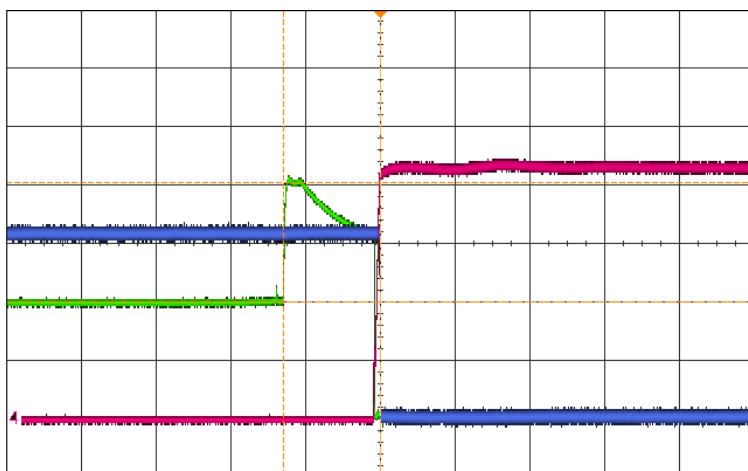
Δ X: 50,2 μ s

Δ Y: 3,175 V

Obrázek 56: Chování výstupního zkratovacího tranzistoru

4.8 Detekce a umělá zátěž

Snímek na obrázku 57 popisuje chování detekčního obvodu, aplikovaného na funkci potkávacího světla. Modrou barvou je znázorňován proud tekoucí přes detekční pin přivedený do řídicí jednotky. Dokud je napětí na LED potkávacího světla (zelený průběh) na své nominální hodnotě, teče přes detekční pin proud okolo 150 mA. Ve chvíli, kdy dojde k rozpojení některé z LED, napětí vystoupá na hodnotu 40,5 V. Za 700 μ s se aktivuje detekční obvod, který otevírá výstupní N-MOS tranzistor Q_{34} napětím s průběhem označeným červenou barvou. Proud tekoucí přes detekční pin klesne až téměř na 0 A. Řídicí jednotka uvnitř automobilu v tu chvíli dostává informaci o poruše LED.



CH1: 10 V/div, 500 μ s/div (zelená)

CH2: 2 V/div, 500 μ s/div (červená)
CH3: 50 mA/div, 500 μ s/div (modrá)

X1: -650 μ s Y1: 40,5 V
X2: 0 s Y2: 20 V
 Δ X: 650 μ s Δ Y: 20,5 V

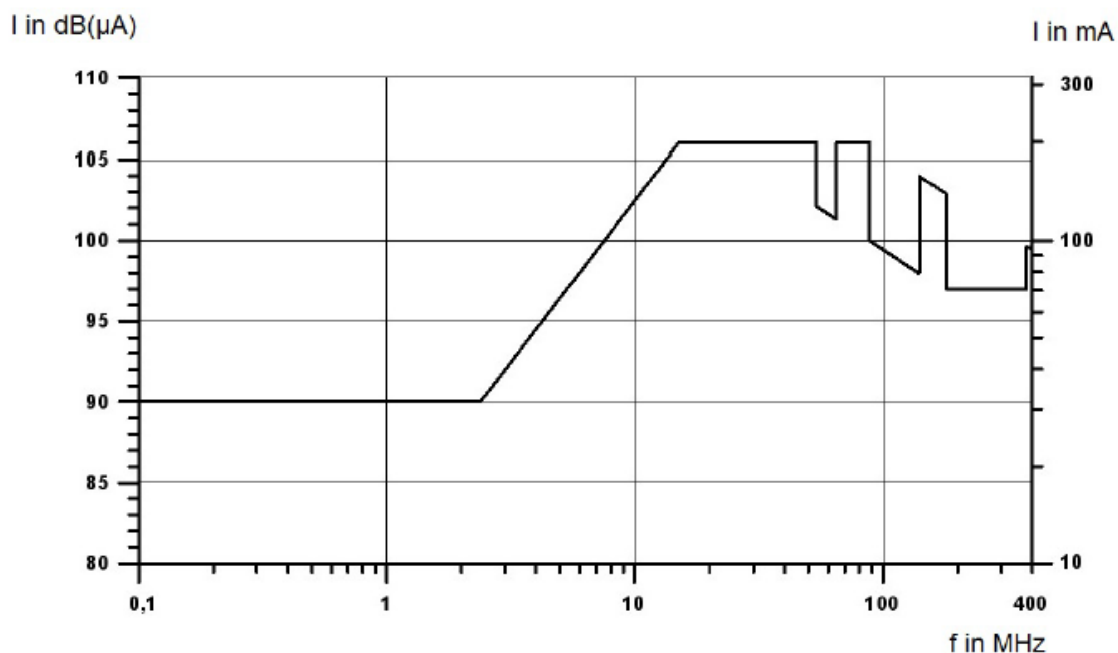
Obrázek 57: Chování detekčního obvodu a proud tekoucí přes detekční pin

4.9 Elektromagnetická kompatibilita

Jak bylo poznamenáno v úvodu této práce, nevýhodou spínaných zdrojů je nutnost potýkat se s emisemi vyzařovanými při vysokofrekvenčním spínání, které jsou součástí souhrnu testů elektromagnetické kompatibility.

Jako první byly provedeny testy odolnosti vůči rušení šířeného po napájecích vodičích (BCI). Celý světlomet se umístí do testovací komory, která zajistí prostředí bez externího rušení, aby byla zaručena přesnost měření. Kabeláž nutná k napájení musí mít přesně definovanou délku dle specifikace zákazníka. Tato specifikace uvádí délku kabeláže v rozmezí 1700 mm – 2000 mm. Injektování rušení je prováděno toroidní cívkou, v jejíž středu je umístěná napájecí kabeláž. Dle specifikace zákazníka se měření provádí ve třech polohách od zdroje, a to 60 cm, 100 cm a 140 cm, pro každou funkci řídicí jednotky zvlášť. Měření je prováděno v rozsahu frekvencí od 100 kHz do 400 MHz a vyhodnocuje se stabilita světelného toku, který se nesmí lišit o více než 30 % než je jeho nominální hodnota. Obrázek 58 ukazuje průběh nastavovaného rušení generovaného toroidní cívkou, kterému musí být světlomet a tedy i řídicí jednotka odolné.

Samotná řídicí jednotka byla testována v nezávislé laboratoři. Pro získání počátečních výsledků nebyla umístěna ve světlometu. Úroveň světelného toku se během testování snímá pomocí optického článku a převádí se na napětí. Při měření byla zjištěna odolnost vyhovující požadavkům podle specifikace.

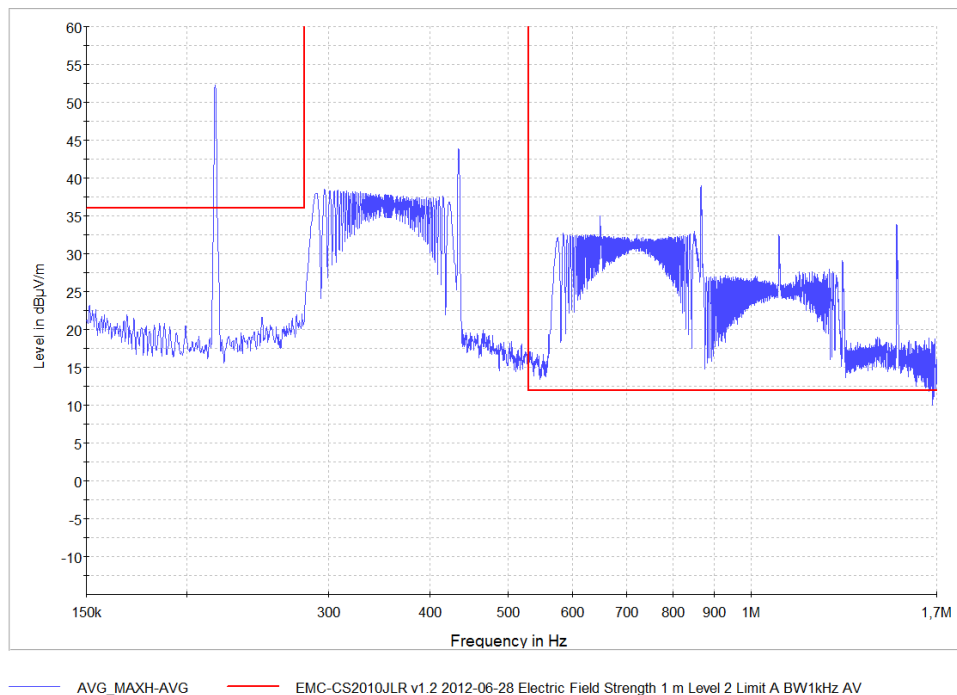


Obrázek 58: Úrovně šumového signálu injektovaného do napájecí kabeláže

Dalším měřením je testování vyzařovacích emisí (RE). Tyto testy slouží ke zkoumání množství vyzařeného rušení v rozsahu frekvencí 150 kHz až 1 GHz. Na začátku měření se světlomet umístí do bez-odrazové komory se stěnami obloženými pyramidovými absorbéry, skládající se ze ztrátového materiálu jako například uhlíkové vlákno, vloženého do polyuretanové pěny. Účelem těchto absorbérů je pohlcovat vyzařené rušení tak, aby se dál neodráželo a nešířilo v místnosti. Uvnitř bez-odrazové komory je na specifikovaném místě umístěna anténa zachycující rušení vyzařované do okolí z měřené řídicí jednotky.

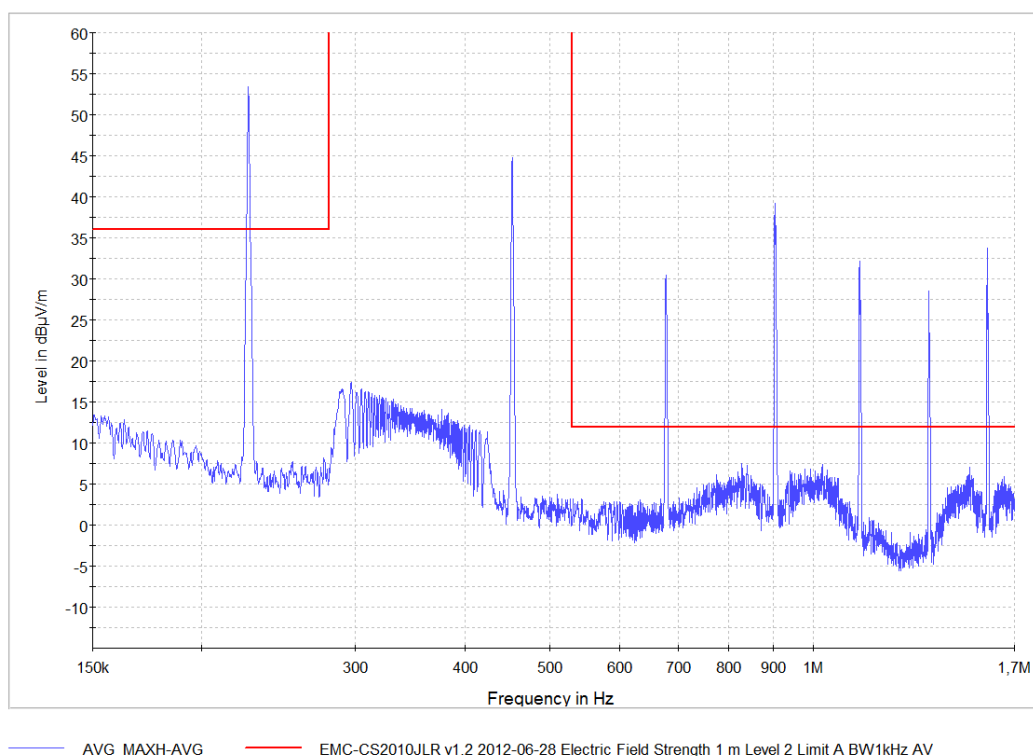
Pro získání počátečních výsledků byla řídicí jednotka testována v nezávislé laboratoři samostatně, bez kompletního světlometu v pásmu nejnižších frekvencí od 150 kHz do 1,7 MHz, které bývají u spínaných zdrojů nejkritičtější s ohledem na spínací frekvence v řádech stovek kHz.

V prvním měření (obrázek 59) byla měřena úroveň vyzařovaného signálu řídicí jednotky bez stínícího krytu. Cílem bylo zjistit ryzí chování obou měničů "BOOST" i "BUCK" bez stínících prvků a případně tak ušetřit náklady na stínící kryt. Z obrázků je patrná špička rušení okolo 200 kHz, pravděpodobně vznikající při spínání měniče "BUCK". Špička se pravidelně objevuje při násobcích 200 kHz, což jsou vyšší harmonické spínací frekvence. Výrazný rušivý signál se objevuje také při násobcích 400 kHz, který může být způsoben spínací frekvencí měniče "BOOST". Napovídá tomu i široký rozsah frekvencí, který je způsoben rozmítáním obvodu MAX16833.



Obrázek 59: Měření vyzařovacích emisí bez stínící kryt

Předchozí domněnky potvrzuje následující měřený průběh rušení, kdy byl na řídicí jednotku osazen stínící kryt. Stínění zakrývá plochu na desce plošných spojů, kde je umístěn měnič "BOOST". Ve srovnání s předchozím měřením je silně potlačeno rušení při frekvencích okolo násobků 400 kHz a dokonce vyhovuje specifikovaným limitům, které jsou vyznačeny červenou barvou. Z toho plyne, že i nastavení rozmítání s rezistorem $R_{121} = 47 \text{ k}\Omega$ může zůstat zachováno. Rušení druhého měniče se nepodařilo výrazně snížit ani při pokusech o filtraci pomocí změny výstupních a vstupních kapacit. Řídicí jednotka tak bude vyžadovat úpravy za účelem splnění specifikovaných limitů. Zlepšení může zajistit buď použití stínícího krytu pro měnič "BUCK" nebo rozmítání spínací frekvence.



Obrázek 60: měření emisí s ochranným štítem nad měničem "BOOST"

Další části testování elektromagnetické kompatibility jako pulsní testování (CI) nebo odolnost vůči rušení šířeného v prostředí (RI) nebyly vykonány, z důvodu vyšších nároků na testovací zařízení. Poslední bod ze stanoveného seznamu testů, kterým byla elektromagnetická kompatibilita, je uzavřen s výsledkem vyžadující zlepšení vyzařovaných signálů vzniklých spínací frekvencí u DC/DC měniče typu "BUCK".

5 ZÁVĚR

Na začátku práce jsem teoreticky popsal 3 základní druhy DC/DC měničů, společně se základními informacemi o diodách emitujících světlo. V další části analyzuji požadavky, které jsou důležité pro definici zadání elektronického systému světlometu pro automobil. Elektronický systém je tvořen sestavou LED modulů a řídicí jednotkou, která má za úkol splnit vyžadované elektrické parametry LED odvozené z optických požadavků. Mezi nimi byl například i požadavek na snižování světelného toku LED, pro tlumení funkce denního osvětlení na funkci obrysového světla, pomocí PWM modulu. Navrhnul jsem podobu řídicí jednotky, koncepčně složenou ze spínaného zdroje s DC/DC měniči typu "BUCK" a "BOOST". Následně jsem sestavil schématickou podobu řídicí jednotky se všemi doplňujícími obvody, aby byly splněny všechny zadané požadavky. Po realizaci vzorku byla řídicí jednotka podrobena měření a testování pro demonstraci shody s teoretickými předpoklady.

S ohledem na požadovanou nízkou cenu jsem se rozhodl řešit napájení funkcí pomocí jednoho proudového zdroje. Kvůli tomu jsem se musel potýkat s několika problémy. Během vývoje řídicí jednotky byl spínaný zdroj topologie "BUCK-BOOST" rozdělen na dva separátní měniče. Důvodem byl vznik proudových špiček, vznikajících při zvyšování napětí při přepínání funkcí. Proudové špičky mají velký vliv na životnost LED. Další komplikací byla nutnost snižování výkonu pro funkci směrového světla, kterou jsem vyřešil použitím PWM modulu.

Pro návrh spínaného zdroje jsem využíval především informace, které poskytují výrobci integrovaných obvodů v katalogových listech. Ty jsem doplňoval všeobecně známými elektronickými principy, díky kterým byl názorně i matematicky sestaven detailní postup návrhu celé řídicí jednotky. Po sestavení LED do sério-paralelních maticí jsem odvodil elektronické parametry, které byly vstupními předpoklady pro návrh právě spínaných zdrojů. Ke spínaným zdrojům bylo nutné vytvořit vstupní obvod, který zajistí požadovaný přísun energie a logický obvod, který bude řídit přepínání funkcí. Návrh se zabývá i řešením poruchových stavů, jejich vyhodnocení a signalizací automobilu.

Měření provedené na realizovaném kusu řídicí jednotky ukázalo velmi dobrou shodu výsledků s předpokládanými hodnotami. Podle stanoveného testovacího plánu byla provedena sekce testů, kde jsem ověřil, že řídicí jednotka splňuje základní požadavky a vyhovuje použití řídicí jednotky v plně LED světlometu určeného pro automobilový průmysl. Například důležitý parametr zvlnění proudu, který by u LED neměl přesáhnout 10 – 20%, byl měřen v rozmezí 3 – 8%. Nepodařilo se splnit limity pro vyzařované emise. Ukázalo se, že DC/DC měnič "BUCK" nelze provozovat bez dalších nutných úprav. Jedním z řešení může být přidání rozmítání na vstup nastavující spínací frekvenci měniče. V rámci diplomové práce nebyly provedeny dlouhodobé testy, které bývají součástí testování výrobků pro automobilový průmysl.

Tímto projektem bylo ověřeno, že i zdánlivě komplikované kombinace funkcí lze složit tak aby je bylo možné budit jedním proudovým zdrojem. Nevýhodou levného řešení však může být komplikovanější návrh a omezený rozsah napětí, který limituje množství připojených LED. Výhodami zamýšlené řídicí jednotky je její jednoduchost pro zástavbu do světlometu, nízká spotřeba energie, nízká cena i relativně malý počet

komponentů ve srovnání s elektronickými systémy, užívanými pro standardní světlomety obsahující dvě nebo tři řídicí jednotky, případně řídicí jednotku s mikroprocesorem a několika separátními spínanými zdroji.

LITERATURA

- [1] Portál odbornecasopisy [online]. 2009 [cit. 2016-02-15]. Dostupné z: www.odbornecasopisy.cz/res/PDF/39810.pdf.
- [2] Portál wikipedia [online]. 2016 [cit. 2016-02-15]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/led#cite_note-1.
- [3] KREJČÍŘÍK, A. Napájecí zdroje I. 2. vyd. Praha: BEN, 1997, 350 s. ISBN 80-86056-02-3
- [4] KREJČÍŘÍK, A. Napájecí zdroje III. 1. vyd. Praha: BEN, 1999, 341 s. ISBN 80-86056-56-2
- [5] KOVÁČ, D., KOVČOVÁ, I., KAŇUCH, J. EMC z hlediska teorie a aplikace. 1. vyd. Praha: BEN, 2006, 216 s. ISBN 80-7300-202-7
- [6] KREJČÍŘÍK, A. DC/DC měniče. 1. vyd. Praha: BEN, 2001, 111 s. ISBN 80-7300-045-8
- [7] Texas Instruments. LM3406 *datasheet*. [cit. 2016-03-26]. 38 s. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm3406.pdf>.
- [8] Maxim integrated. MAX16833 *datasheet*. [cit. 2016-03-26]. 23 s. Dostupné z: <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX16833-MAX16833D.pdf>.
- [9] Nichia Corporation. NCSW1700BT *datasheet*. [cit. 2016-03-26]. 18 s. Dostupné z: <https://www.nichia.co.jp/specification/products/led/NCSW170B-E.pdf>.
- [10] Nichia Corporation. NCSA170BT *datasheet*. [cit. 2016-03-26]. 18 s. Dostupné z: <https://www.nichia.co.jp/specification/products/led/NCSA170B-E.pdf>.
- [11] Nichia Corporation. NJSW172AT *datasheet*. [cit. 2016-03-26]. 17 s. Dostupné z: <https://www.nichia.co.jp/specification/products/led/NJSW172A-E.pdf>.
- [12] Vishay. SQD25N15-52 *datasheet*. [cit. 2016-03-26]. 11 s. Dostupné z: <http://www.vishay.com/docs/68604/sqd25n15-52.pdf>.
- [13] Vishay. SQD50P06-15L *datasheet*. [cit. 2016-03-26]. 9 s. Dostupné z: <http://www.vishay.com/docs/69098/sqd50p06.pdf>.
- [14] ON Semiconductor. NCV2904DR2G *datasheet*. [cit. 2016-03-26]. 15 s. Dostupné z: <http://www.mouser.com/ds/2/308/LM358-D-106278.pdf>.
- [15] ON Semiconductor. P6SMB36CAT3G *datasheet*. [cit. 2016-03-26]. 7 s. Dostupné z: http://www.mouser.com/ds/2/308/onsemiconductor_p6smb11cat3-d-493527.pdf.
- [16] NXP Semiconductors. MMBT3906 *datasheet*. [cit. 2016-03-26]. 8 s. Dostupné z: http://www.nxp.com/documents/data_sheet/MMBT3906.pdf.
- [17] Fairchild. MMBTA06 *datasheet*. [cit. 2016-03-26]. 9 s. Dostupné z: <http://www.mouser.com/ds/2/149/MMBTA06-889802.pdf>.
- [18] Fairchild. MMBTA56 *datasheet*. [cit. 2016-03-26]. 7 s. Dostupné z: <https://www.fairchildsemi.com/datasheets/MM/MMBTA56.pdf>.
- [19] NXP Semiconductors. BCX53-16 *datasheet*. [cit. 2016-03-26]. 22 s. Dostupné z: http://cache.nxp.com/documents/data_sheet/BCP53_BCX53_BC53PA.pdf?pspll=1.
- [20] Fairchild. MMBT3904 *datasheet*. [cit. 2016-03-26]. 13 s. Dostupné z: <http://www.mouser.com/ds/2/149/MMBT3904-889797.pdf>.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

BCI	Odolnost vůči rušení indukovaného do kabeláže
CI	Pulsní testování
DP	Filtr dolní propusti
EMC	Elektromagnetická kompatibilita
EPA	ESD chráněné území
ESD	Elektrostatický výboj
FR4	Čtyřvrstvá plátovaná deska plošného spoje
HAL	Povrchová bezolovnatá úprava
LDM	Řídicí modul světlo emitujících diod
LED	Světlo emitující dioda
MOS	Tranzistor řízený elektrickým polem
OVP	Přepět'ová ochrana
PWM	Pulzně šířková modulace
RE	Měření vyzařovacích emisí
RI	Imunita vůči rušení šířeného v prostředí
UVP	Podpět'ová ochrana
°C	Jednotka teploty - stupeň Celsia
A	jednotka proudu - Ampér
C	Kondenzátor
D	Dioda
F	Jednotka kapacity – Farad
H	Jednotka indukčnosti – Henry
Hz	Jednotka frekvence – Hertz
I	Proud
IC	Integrovaný obvod
L	Indukčnost cívky
lm	Jednotka světelného toku – lumen
P	Výkon
Q	Tranzistor
R	Odpor rezistoru
t	Veličina čas

U	Napětí
V	Jednotka napětí – Volt
W	Jednotka výkonu – Watt
Ω	Jednotka rezistoru – Ohm
$C_{BO\ MIN}$	Minimální požadovaná výstupní kapacita měniče "BOOST"
C_{COMP}	Externí kapacita měniče "BUCK"
C_{MIN}	Minimální vstupní kapacita měniče "BOOST"
D_{BU}	Činitel plnění měniče "BUCK"
$D_{MAX\ BO}$	Maximální činitel plnění měniče "BOOST"
D_{OS}	Činitel plnění obrysového světla
D_{PWM}	Činitel plnění PWM generátoru
D_S	Činitel plnění směrového světla
f_{BO}	Spínací frekvence měniče "BOOST"
f_{BU}	Spínací frekvence měniče "BUCK"
f_{PWM}	Frekvence PWM generátoru
f_S	Startovací frekvence
I_{DET}	Výstupní proud umělé zátěže
$I_{DET\ OFF}$	Výstupní proud umělé zátěže při bezchybné funkci
$I_{DET\ ON\ MAX}$	Výstupní proud umělé zátěže při chybné funkci
I_{VYP}	Proud uzavírající obvod v době vypnutého tranzistoru
I_{ZAP}	Proud uzavírající obvod v době zapnutého tranzistoru
$I_{C\ VYP}$	Proud tekoucí kondenzátorem v době vypnutého tranzistoru
$I_{C\ ZAP}$	Proud tekoucí kondenzátorem v době zapnutého tranzistoru
I_D	Proud dálkového světla
I_{DO}	Proud denního osvětlení
$I_{L\ BO}$	Proud cívky měniče "BOOST"
$I_{L\ VYP}$	Proud tekoucí cívky v době vypnutého tranzistoru
$I_{L\ ZAP}$	Proud tekoucí cívky v době zapnutého tranzistoru
I_{LED}	Proud protékající LED modulem
$I_{LP\ BO}$	Špičkový proud cívky měniče "BOOST"
I_p	Proud potkávacího světla
I_S	Proud směrového světla
L_{BO}	Velikost cívky měniče "BOOST"
P_{IN}	Vstupní výkon

P_{LED}	Výkon na LED modulu
P_{BO}	Výkon měniče "BOOST"
P_{BU}	Výkon měniče "BUCK"
P_{RCS}	Výkon na rezistoru R_{CS}
$R_{DS\ BO}$	Odpor spínacího tranzistoru měniče "BOOST"
$R_{DS\ BU}$	Odpor spínacího tranzistoru měniče "BUCK"
R_{LED}	Nastavovací externí rezistor
R_{ON}	Spínací rezistor
R_{SN}	Snímací rezistor
T_A	Teplota okolí
$T_{A\ MAX}$	Maximální teplota okolí
$T_{A\ MIN}$	Minimální teplota okolí
T_{MAX}	Maximální teplota
T_{NOM}	Nominální teplota
$t_{OFF\ BU}$	Minimální doba vypnutí MOS tranzistoru měniče "BUCK"
$t_{OFF\ OS}$	Čas vypnutí PWM generátoru pro funkci obrysového světla
$t_{ON\ OS}$	Čas zapnutí PWM generátoru pro funkci obrysového světla
U_{DET}	Vstupní napětí umělé zátěže
$U_{DET\ MAX}$	Maximální vstupní napětí umělé zátěže
$U_{DET\ P}$	Napětí na výstupu detekčního obvodu potkávacího světla
U_{BO}	Výstupní napětí měniče "BOOST"
$U_{CE\ SAT}$	Napětí kolektor-emitor v saturaci
U_{CS}	Prahové napětí na pinu CS
U_D	Napětí na dálkovém světle
$U_{D\ BU}$	Úbytek napětí na diodě měniče "BUCK"
U_{DO}	Napětí na denním osvětlení
U_{DS}	Napětí na MOS tranzistoru mezi piny "Drain" a "Source"
U_{ICTRL}	Napětí na pinu ICTRL
U_{IN}	Vstupní napětí
$U_{IN\ BO}$	Vstupní napětí měniče "BOOST"
$U_{IN\ BU}$	Vstupní napětí měniče "BUCK"
$U_{IN\ D}$	Vstupní napětí pro aktivaci dálkového světla
$U_{IN\ DO}$	Vstupní napětí pro aktivaci denního svícení
$U_{IN\ MIN}$	Minimální vstupní napětí

$U_{IN\ OS}$	Vstupní napětí pro aktivaci obrysového světla
$U_{IN\ P}$	Vstupní napětí pro aktivaci potkávacího světla
$U_{L\ VYP}$	Napětí na cívce v době vypnutého tranzistoru
$U_{L\ ZAP}$	Napětí na cívce v době zapnutého tranzistoru
U_{LED}	Napětí na světlo emitujících diodách
$U_{MAX\ BU}$	Nejvyšší možné vstupní napětí pro měnič "BUCK"
$U_{MOS\ BU}$	Úbytek napětí na spínacím tranzistoru měniče "BUCK"
$U_{N\ DET\ DO}$	Negované výstupní napětí detekčního obvodu denního osvětlení
$U_{N\ DET\ P}$	Negované výstupní napětí detekčního obvodu potkávacího světla
U_{OVP}	Napětí na pinu OVP
U_P	Napětí potkávacího světla
U_{PWMDIM}	Velikost napětí na pinu PWMDIM
$U_{REF\ BU}$	Napět'ová reference měniče "BUCK"
U_S	Napětí směrového světla
U_{SENSE}	Vstupní napětí diferenčního zesilovače
U_{VCC}	Sedmi-Voltový regulátor napětí
$\Delta I_{L\ BO}$	Zvlnění proudu procházející cívkou měniče "BOOST"
ΔI_{LED}	Zvlnění proudu LED
$\Delta I_{LED\ 10k}$	Absolutní chyba proudu na $R_{LED} = 10\ k\Omega$
δI_{LED}	Relativní hodnota zvlnění výstupního proudu
$\delta I_{LED\ 10k}$	Relativní chyba proudu na $R_{LED} = 10\ k\Omega$
ΔU_{BO}	Zvlnění výstupního napětí měniče "BOOST"
ΔU_{IN}	Zvlnění vstupního napětí
η	Účinnost
η_{BO}	Účinnost měniče "BOOST"
η_{BO+BU}	Účinnost DC/DC měničů
η_{BU}	Účinnost měniče "BUCK"
σ_I	Proudový koeficient světelného toku
$\sigma_{IS\ 450}$	Proudový koeficient směrového světla při proudu 450 mA
σ_{TD}	Teplotní koeficient světelného toku dálkového světla
σ_{TP}	Teplotní koeficient světelného toku potkávacího světla
ϕ_D	Světelný tok dálkového světla
ϕ_{DO}	Světelný tok denního svícení
$\phi_{NOM\ P}$	Nominální světelný tok potkávacího světla

$\phi_{\text{NOM S}}$	Nominální světelný tok směrového svícení
ϕ_{P}	Světelný tok potkávacího světla
ϕ_{S}	Světelný tok směrového svícení

